

Univerzita Karlova v Praze
Přírodovědecká fakulta
Katedra fyzické geografie a geoekologie



Vít MACA
ANALÝZA NÁCHYLNOSTI KE SVAHOVÝM POHYBŮM V POVODÍ
JEMMY (ETIOPSKÁ VYSOČINA)
The susceptibility analysis of slope movements in the Jemma River
basin (Ethiopian Highland)

Diplomová práce

Praha 2015

Vedoucí bakalářské práce: doc. RNDr. Vít Vilímek, CSc.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně s použitím zdrojů, které jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Svoluji zapůjčení této práce pro studijní účely a souhlasím s tím, aby byla řádně vedena v evidenci vypůjčovatelů.

V Praze dne 18. 4. 2015

Vít MACA

Děkuji svému vedoucímu práce doc. RNDr. Vítu Vilímkovi CSc. za pomoc, ochotu a trpělivost, které byla potřeba pro vypracování této diplomové práce. Dále chci poděkovat mé rodině a přátelům za podporu během celého studia.

Zadání práce

Název práce:

ANALÝZA NÁCHYLNOSTI KE SVAHOVÝM POHYBŮM V POVODÍ JEMMY (ETIOPSKÁ VYSOČINA)

Cíle práce:

Cílem diplomové práce je syntéza poznatků literatury z oblasti náchylnosti ke svahovým pohybům, včetně popisu jednotlivých faktorů. V praktické části je představena metodika modelování náchylnosti ke svahovým pohybům, která vznikla modifikací zahraničních metodik. Jedním ze vstupů do metodiky je datová vrstva svahových pohybů, která musí být vytvořena. Tato metodika bude následně uplatněna na zkoukamnou oblast pro vytvoření mapy náchylnosti. Hlavním cílem této práce je zjistit, kde se vyskytují oblasti s největší náchylností a jaké faktory na to mají největší vliv.

Použité metody práce:

studium odborné literatury, Google Earth, terénní mapování, zpracování dat v GIS prostředí

Zájmové území:

Povodí Jemmy, Etiopská vysočina. Lokalita Portugalský most

Datum zadání:

12.9.2014

Podpis studenta

.....

Vít Maca

Podpis vedoucího práce

.....

Doc. RNDr. Vít Vilímek, CSc.

Abstrakt

Etiopie je, stejně jako další rozvojové země, závislá na domácí zemědělské výrobě, potýká s problémy s infrastrukturou a zdravotnictvím je také na nízké úrovni. K těmto faktorům se zde přidávají také katastrofické zásahy přírodních procesů. Svahové pohyby v této oblasti mají za následek obrovské materiální škody ale také lidská úmrtí. Dopady těchto škod jsou obrovské a místní se s nimi jen těžce vyrovnávají. Proto by předcházení těmto škodám mělo být prioritním zájmem.

V teoretické části jsou představena základní fakta o modelování svahových pohybů a modelování náchylnosti, která jsou doplněna konkrétními výzkumy z oblasti Etiopské vysočiny. Dále je popsána metodika, která byla použita. Ta srovnává reálné zastoupení svahových pohybů vůči očekávanému výskytu napříč třídami jednotlivých vstupních vrstev. Nutnou součástí modelu jsou mapovací práce, podložené terénními pracemi, během kterých bylo vymapováno 242 svahových pohybů. Dalšími parametry modelu jsou: sklonitost, nadmořská výška, litologie, land cover, vzdálenost ke geologickému rozhraní a vzdálenost k vodnímu toku. Jako nejvýznamnější faktor byla určena sklonitost. Použitá metodika je univerzálně použitelná a výsledky, které generuje, dobře odpovídají realitě.

Klíčová slova: svahové pohyby, přírodní ohrožení, náchylnost k sesouvání, geomorfologie, Etiopská vysočina

Abstract

Ethiopia like other developing countries depends on domestic agricultural production, struggling with infrastructure and healthcare is also at a low level. Among these factors there is also added impact of catastrophic natural processes. Landslides in this area have caused enormous material damage and also human deaths. Effects of those losses are huge and locals are dealing with them difficultly. Therefore, prevention should be a priority concern.

In theoretical part the basic facts about modeling and simulation of landslides susceptibility is presented. Those facts are complemented with specific researches from Ethiopian highlands. Furthermore, it describes the methodology that was used. It compares the real distribution of slope movements against the expected occurrence across the classes of input layers. An essential part of the model is mapping work, supported with terrain work, during which 242 landslides was mapped. Model parameters are: slope, altitude, lithology, land cover, distance from geological boundary and distance to river. Slope was determined as most significant factor. Used methodology is universally applicable and the results it generates match reality well.

Key words: slope movements, natural hazards, susceptibility analysis, geomorphology, Ethiopian Highland

Obsah

1. Úvod	11
2. Vymezení a charakteristika oblasti.....	11
2.1 Vymezení oblasti	11
2.2 Fyzickogeografická charakteristika oblasti.....	12
3. Eroze půd a svahové pohyby v Etiopské vysočině.....	14
3.1 Eroze půd a degradace v Etiopské vysočině.....	14
3.2 Svahové pohyby v Etiopské vysočině	16
3.2.1 Svahové pohyby.....	16
3.2.2 Předběžné faktory svahových pohybů v Etiopské vysočině	19
3.2.3 Spouštěcí faktory (triggery) svahových pohybů v Etiopské vysočině.....	22
3.2.4 Svahové pohyby v Etiopské vysočině	25
4. Náchylnost ke svahovým ohrožením v Etiopské vysočině	31
4.1 Modely náchylnosti v Etiopské vysočině	35
5. Metodika práce	46
5.1 Fáze datová.....	46
5.2 Fáze terénní.....	47
5.3 Fáze modelovací	47
5.3.1 Nadmořská výška (NM)	48
5.3.2 Sklonitost (SKL).....	52
5.3.3 Litologie (GP)	55
5.3.4 Vzdálenost ke geologickému rozhraní (GS).....	56
5.3.5 Land Cover/LandUse (LC)	57
5.3.6 Vzdálenost k vodnímu toku (VVT)	58
5.3.7 Významnost tříd parametrů	60
5.3.8 Stanovení vah parametru	68
5.3.9 Vážený překryv	68

5.4	Fáze – Verifikační.....	69
6.	Výsledky práce.....	70
6.1	Datová fáze.....	70
6.2	Modelovací fáze	74
6.3	Verifikační fáze	77
7.	Diskuze.....	78
8.	Závěr	81
9.	Seznam literatury	83

Seznam obrázků

Obrázek 1:	Poloha vymezené oblasti, zdroj Google Earth	12
Obrázek 2:	Klimadiagram stanice Gondar a stanice Addis Abeba.....	13
Obrázek 3:	Příklad krajinného pokryvu, typické keřovité a nízké porosty	13
Obrázek 4:	Příklad degradace půd, několikametrové strže v jinak rovinaté oblasti kolem Key Afar....	15
Obrázek 5:	Příklad říčení z oblasti	17
Obrázek 6:	Klasifikace svahových pohybů dle svahového materiálu a mechanismu pohybu	18
Obrázek 7:	Typy svahů na řezu elevací.....	20
Obrázek 8:	Příklad zpětné eroze na Modrém Nilu	24
Obrázek 9:	Příklad znázornění rychlostí v říčním korytě	25
Obrázek 10:	Říční meandr s vyznačenými body s nejintenzivnější erozí a ukládáním	25
Obrázek 11:	Příčný řez údolím Modrého Nilu v oblasti Dejen-Gohatsion	27
Obrázek 12:	Sklonitost svahů a distribuce jednotlivých typů svahových pohybů v údolí Modrého Nilu v lokalitě Dejen-Gohatsion	28
Obrázek 13:	Příčný řez lokalitou Dessie	29
Obrázek 14:	Pohled na hřeben Tossa na západ od města Dessie	30
Obrázek 15:	Pohled do údolí ve zkoumané oblasti	31

Obrázek 16: Příklad umístění vesnice přímo pod několika sesuvy.....	33
Obrázek 17: Příklad mapy náchylnosti z povodí Jemmy	34
Obrázek 18: Přehled jednotlivých přístupů k hodnocení náchylnosti.....	35
Obrázek 19: Přehled reklasifikovaných vrstev, do jednotného rozpětí	36
Obrázek 20: Výsledek lineární kombinace před reklasifikací, reklasifikovaná mapa náchylnosti.....	38
Obrázek 21: Neklasifikovaný a klasifikovaný výstup metody Statistického indexu dle Van Westena ..	39
Obrázek 22: Neklasifikovaný a klasifikovaný výstup metody Certainty factor	40
Obrázek 23: Srovnání výsledků metody Statistical Index a Certainty Factor	41
Obrázek 24: Mapa náchylnosti z oblasti Dessie	43
Obrázek 25: Příklad inženýrskogeologické mapy lokality Portugalský most.....	45
Obrázek 26: Ukázka map náchylnosti z lokality Portugalský most, rozdělení na 14 a 4 zóny.....	45
Obrázek 27: Proces metodiky.....	46
Obrázek 28: Znázornění časových řezů v Google Earth	47
Obrázek 29: Pohled do údolí, s jasně znatelnými úrovněmi strukturních teras	50
Obrázek 30: Vizualizace říčení z Google Earth na rozrušené hraně vrchní strukturní terasy	50
Obrázek 31: Topografická mapa širší oblasti.....	51
Obrázek 32: Reklasifikovaná topografická mapa	52
Obrázek 33: Vizualizace sklonitosti širší oblasti	54
Obrázek 34: Reklasifikovaná mapa sklonitosti zkoumané oblasti.....	55
Obrázek 35: Geologická mapa oblasti	56
Obrázek 36: Mapa vzdálenosti od geologického rozhraní	57
Obrázek 37: Mapa Land Coveru	58
Obrázek 38: Vzdálenost k vodnímu toku.....	59
Obrázek 39: Vizualizace koryta v povodí Jemmy z lokality Portugalský most.....	60
Obrázek 40: Znázornění průběhu Weighted Overlay.....	69
Obrázek 41: Ukázka vizualizace v Google Earth	70

Obrázek 42: Výsledná mapa náchylnosti, rozdělená do 4 skupin	75
Obrázek 43: Výsledná mapa náchylnosti, rozdělená do 4 skupin s vyznačenými svahovými pohyby ..	75

Pozn.: Všechny použité fotografie byly pořízeny během terénních prací v roce 2014

Seznam tabulek

Tabulka 1: Vývoj rozlohy lesů v Etiopii	15
Tabulka 2: Přehled vah jednotlivých faktorů.....	37
Tabulka 3: Skórovací tabulka pro jednotlivá ohrožení a energii reliéfu	44
Tabulka 4: Základní statistické ukazatele pro závislost svahových pohybů na nadmořské výšce	49
Tabulka 5: Zastoupení jednotlivých tříd a klíč pro reklasifikaci.....	51
Tabulka 6: Základní statistické ukazatele pro závislost svahových pohybů na sklonitosti.....	53
Tabulka 7: Zastoupení jednotlivých tříd a klíč pro reklasifikaci.....	54
Tabulka 8: Zastoupení jednotlivých tříd a klíč pro reklasifikaci.....	56
Tabulka 9: Zastoupení jednotlivých tříd a klíč pro reklasifikaci.....	57
Tabulka 10: Zastoupení jednotlivých tříd a klíč pro reklasifikaci.....	58
Tabulka 11: Zastoupení jednotlivých tříd a klíč pro reklasifikaci.....	59
Tabulka 12: Určení významnosti tříd parametru litologie.....	62
Tabulka 13: Určení významnosti tříd parametru nadmořské výšky	63
Tabulka 14: Určení významnosti tříd parametru sklonitosti	64
Tabulka 15: Určení významnosti tříd parametru vzdálenosti od vodního toku	65
Tabulka 16: Určení významnosti tříd parametru Land Cover.....	66
Tabulka 17: Určení významnosti tříd parametru vzdálenosti od geologického rozhraní.....	67
Tabulka 18: Určení vah parametru.....	68
Tabulka 19: Přehled finálních vah jednotlivých vstupujících parametrů	75

Tabulka 20: Zastoupení jednotlivých tříd náchylnosti ve zkoumané oblasti.....	76
Tabulka 21: Srovnání teoretického a skutečného rozdělení svahových pohybů do tříd náchylnosti ..	76
Tabulka 22: Distribuce svahových pohybů dle typu do tříd náchylnosti.....	76
Tabulka 23: Srovnání teoretického a skutečného rozdělení verifikačních pohybů do tříd náchylnosti	77

Seznam grafů

Graf 1: Vývoj míry zahlubování od doby před 30 miliony let	25
Graf 2: Typ svahového pohybu v závislosti na nadmořské výšce	49
Graf 3: Typ svahového pohybu v závislosti na sklonitosti	53
Graf 4: Graf funkce přirozeného logaritmu	61
Graf 5: Zastoupení tříd v oblasti, zastoupení pohybů v třídě dle litologie	62
Graf 6: Zastoupení tříd v oblasti, zastoupení pohybů v třídě dle nadmořské výšky	63
Graf 7: Zastoupení tříd v oblasti a zastoupení pohybů v třídě dle sklonitosti.....	65
Graf 8: Zastoupení tříd v oblasti a zastoupení pohybů v třídě dle vzdálenosti od vodního toku.....	66
Graf 9: Zastoupení tříd v oblasti a zastoupení pohybů v třídě dle Land Cover	67
Graf 10: Zastoupení tříd v oblasti a zastoupení pohybů v třídě dle vzdálenosti od geologického rozhraní	68
Graf 11: Rozložení tříd náchylnosti dle počtu svahových pohybů.....	69
Graf 12: Zastoupení jednotlivých typů svahových pohybů	71
Graf 13: Závislost sklonitosti a nadmořské výšky na typu svahového pohybu	71
Graf 14: Svahové pohyby dle litologie.....	72
Graf 15: Proudové pohyby dle litologie.....	73
Graf 16: Řízení dle litologie	73
Graf 17: Sesuvy dle litologie	74

1. Úvod

Etiopie jako jedna z nejchudších zemí světa je odkázána na zdroje z jiných částí světa a to nejenom finanční, ale také informační. Etiopie je stejně jako další rozvojové země závislá na domácí zemědělské výrobě, potýká s problémy s infrastrukturou a zdravotnictvím je také na nízké úrovni. K těmto faktorům se zde přidávají také katastrofické zásahy přírodních procesů. Svahové pohyby v této oblasti mají za následek obrovské materiální škody ale také lidská úmrtí. Dopady těchto škod jsou obrovské a místní se s nimi jen těžce vyrovnávají. Proto by předcházení těmto škodám mělo být prioritním zájmem.

Cílem teoretické části této práce je rešerše zahraniční literatury zabývající se problematikou svahových pohybů a jejich modelování. Bohužel množství literatury z Etiopské vysočiny není příliš velké, nicméně situace se zlepšuje. V první části jsou analyzovány faktory ovlivňující vznik svahových pohybů a mechanismy k nim vedoucí. V další části už jsou rozebrány konkrétní výzkumy svahových pohybů z lokalit v oblasti Etiopské vysočiny na což navazuje závěrečná část o modelování náchylnosti.

Cílem praktické části této práce je inventarizace a kategorizace svahových pohybů v oblasti povodí Jemmy, lokalita Portugalský most. Spolu s těmito výstupy je dalším cílem vytvoření metodiky modelování náchylnosti ke svahovým pohybům na základě dat dálkového průzkumu země a následná aplikace tohoto modelu na zájmové území. Tvorba takového modelu může místním pomoci v efektivnějším a bezpečnějším hospodaření a s trochou nadsázky může zachránit i lidské životy. Vytvořená metodika by měla být univerzální a dostatečně podrobně popsána, tak aby bylo možné ji použít i v jiných částech světa.

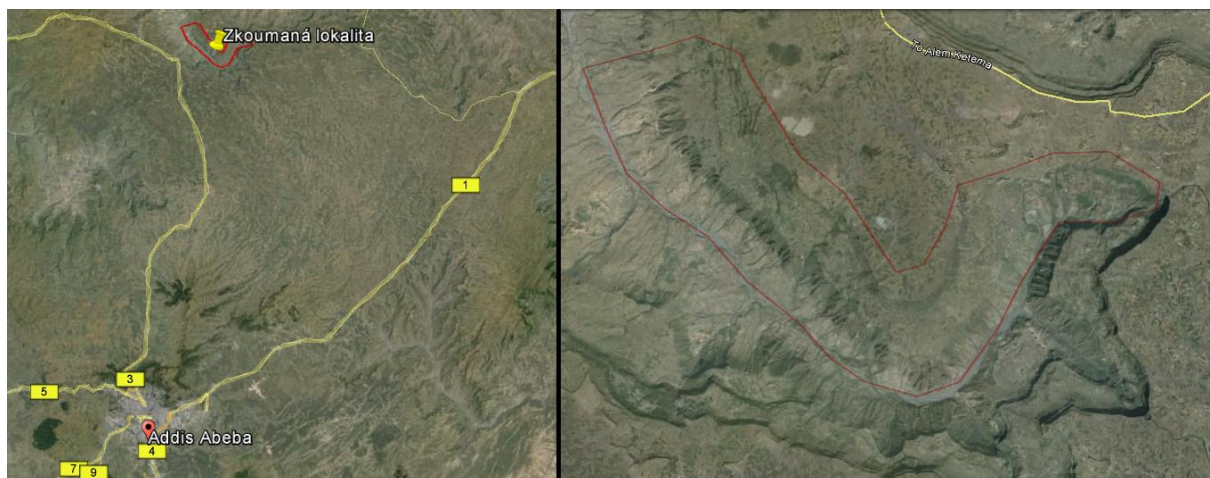
Hlavním cílem mé práce je tedy analýza náchylnosti ke svahovým pohybům v povodí Jemmy, která je provedena na základě vytvořeného modelu náchylnosti. K vytvoření tohoto modelu bylo nutné zorientovat se v problematice modelování náchylnosti, ale také podrobné seznámení se s oblastí.

2. Vymezení a charakteristika oblasti

2.1 Vymezení oblasti

Zkoumaná oblast se nachází v centru Etiopské vysočiny, přibližně 200 kilometrů severně od hlavního města. Hlavním vodním tokem v oblasti je levostranný přítok Jemmy. Oblast byla vymezena uměle. Její začátek na východě je v místech, kde je koryto výrazně zahloubeno do údolí, na západě je ukončeno plochou oblastí před soutokem s řekou Jemmou. Dolní hranice oblasti je určena vodním tokem, horní pak nejvyšším stupněm strukturní terasy (mírně rozšířeno). Tato oblast má jednotnou morfologii, která

se za jejími hranicemi výrazně mění. Dalším výrazným aspektem pro výběr této oblasti byly poskytnuté informace z předešlých výzkumů, znalost prostředí a v neposlední řadě také dostupnost pro terénní práce. Oblast je protáhlého tvaru s rozlohou přibližně 50 km².

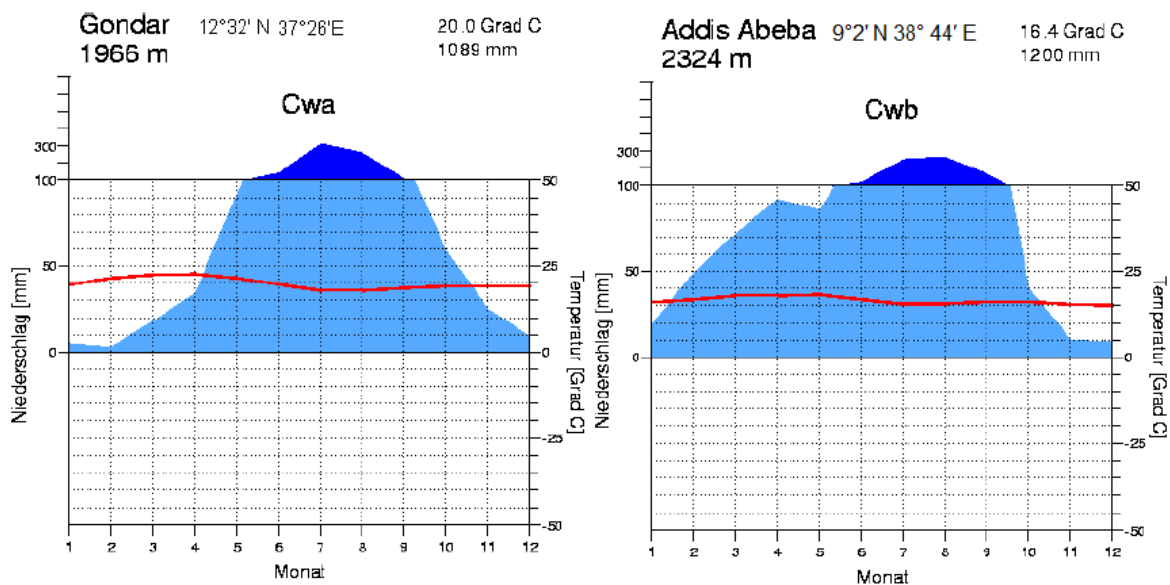


Obrázek 1: Poloha vymezené oblasti, zdroj Google Earth

2.2 Fyzickogeografická charakteristika oblasti

Maximální nadmořská výška je 2676, naopak nejnižší 1381 m. Hlavními půdními typy v této oblasti jsou leptosoly a vertisoly. Vertisoly jsou těžké jílové půdy typické tzv. vertisol efektem, tedy schopností absorbovat velké množství vody, ale jakmile je sucho, tak půda popraská. Tím vznikají v půdách velké trhliny, které poté urychlují půdní erozi. Leptosoly (řecky leptos, znamená primitivní, iniciální) jsou slabě vyvinuté půdy na pevných horninách. Hlavním znakem je především mělkost jejich profilu a vysoká skeletovitost. V této oblasti se jedná především o litozemě.

Co se podnebí týče, majoritní vliv na něj kromě polohy má nadmořská výška. Teploty se během roku výrazněji nemění. V zimních měsících v oblasti převládá severovýchodní pasát, který sem přináší suchý kontinentální tropický vzduch z Arábie. V létě naopak vlhký jižní monzun (www.zemepis.com). Velký vliv na chod srážek mají orografické poměry, které zde zachytávají velkou část srážek. Nejnižší srážky jsou v severní části (500-1000 mm/rok), které s postupem na západ narůstají až na 1800 mm ročně. Více než 80 % srážek vypadne v období od července do října (Kim et al. 2008). Průměrná roční teplota se drží kolem 20°C.



Obrázek 2: Klimadiagram stanice Gondar (12°32' s.š., 37°26' v.d.) a stanice Addis Abeba (9°2' s.š., 38°44' v.d.). Na vodorovné ose jsou vyneseny měsíce roku, na svislé množství srážek a průměrná teplota, zdroj: www.klimmadiagramme.de

Ohledně krajinného pokryvu převažuje nízká vegetace, většinou traviny a křoviny v mozaice s ornou půdou. Toto rozložení krajinného pokryvu je mimojiné důsledkem silně sezónních srážek a intenzivní půdní eroze, ta je popsána v samostatné kapitole. Příklad typického krajinného pokryvu je názorný na přiložené fotografii.



Obrázek 3: Příklad krajinného pokryvu, typické keřovité a nízké porosty

Co se geologie týče, v oblasti je šest geologických jednotek, které jsou uspořádány do pásů rovnoběžných s korytem řeky. Tyto pásy také odpovídají výškové členitosti oblasti, kdy s rostoucí vzdáleností od řeky narůstá nadmořská výška. Koryto řeky je tvořeno aluviálními sedimenty, druhohorními jílovci, prachovci a pískovci. S postupem dále od řeky jsou vrstvy pískovců, které na úrovni strukturní terasy končí a přechází do úzého pásu nižších třetihorních bazaltů. Tento velice úzký pás je překryt tufovými uloženinami smíchanými s bazalty. Tato jednotka zabírá dominantní část území. Dále od vodního toku na tuto vrstvu nasedají vyšší opět třetihorní bazalty, které tvoří hranu další strukturní terasy. Geologická mapa je umístěna v praktické části.

3. Eroze půd a svahové pohyby v Etiopské vysočině

3.1 Eroze půd a degradace v Etiopské vysočině

Degradace půd je jeden z hlavních problémů Etiopie. Nejzávažnějším mechanismem degradace půdy však představuje eroze půdy. V této oblasti se jedná především o erozi stržovou, kdy strže mají i několikametrovou hloubku. Obecně ve vyšších polohách svahu ubývá orniční vrstvy a klesá její úrodnost. Ve spodních částech svahu, kde dochází k usazování přemístěné zeminy, se úrodnost půdy tomu úměrně nezvyšuje. Pozemky postižené abnormální erozí jsou nejen celkově ochuzovány o ornici a živiny, ale jsou i rozbrázděny rýhami a výmoly, což ztěžuje jejich obdělávání (Pasák a kol. 1984). Dopady nejsou však pouze v oblasti hospodářství, ale dochází také k úmrtím. Při intenzivní srážce se ve hlubokých stržích kumuluje voda z velké oblasti a ta poté zasáhne vesnici níže. Faktorem podporujícím degradační procesy je také nevhodný typ půd na tomto území, jak již bylo popsáno v úvodní části. Eroze v povodí Modrého Nilu dosahuje hodnot $770 \pm 150 \text{ t/km}^2$ (Garzanti et al. 2006). Sedimenty pocházející z Etiopské vysočiny nalezneme uloženy v aluviálních kuželech v Sudánu a významně se podílí také na budování říční delty Nilu v Egyptě, dokonce až 96% nilských sedimentů pochází ze severozápadní části Etiopské vysočiny (Garzanti et al. 2006).



Obrázek 4: Příklad degradace půd, několikametrové strže v jinak rovinaté oblasti kolem města Key Afar.

Eroze a degradace půd má v této oblasti pět hlavních příčin a urychlujících faktorů. Prvním z nich je deforestace. Bedrna (2002), uvádí, že eroze půdy je výrazně urychlena po změně přírodních podmínek antropogenní činností a to hlavně po odstranění a změně vegetace. Bishaw (2009) tvrdí, že zbavení půdy vegetace vede k její rychlé a závažné degradaci. Deforestace v Etiopii probíhá extrémně rychle a má rozličné příčiny (zábor půdy, konstrukční účely, palivo,...). Její rychlý průběh ilustruje následující tabulka.

Snižování rozlohy lesů	Přirozený výskyt lesů	1950	1990	2000
Etiopie	65%	16%	2.70%	2.20%
Etiopská Vysočina	90%	20%	?%	5.60%

Tabulka 1: Vývoj rozlohy lesů v Etiopii, zdroj: Berry 2003

Konkrétně v Etiopii je eroze urychlena také nevhodnou kombinací hornatého reliéfu s rozsáhlými oblastmi se sklonem přes 16° a vysokou intenzitou srážek, které mají výrazně sezónní charakter (Bishaw 2009). Nejvyšší bod je Ras Dashan s nadmořskou výškou 4550m nejnižší bod je Danakilská

proláklna s nadmořskou výškou -125 m. Zároveň jsou zde k vidění i obrovské změny v nadmořské výšce na malých úsecích. Například údolí Modrého Nilu nebo Jemmy dosahuje na 5 km převýšení 1500 m.

Nejnižší srážky jsou v severní části (500-1000 mm/rok), které s postupem na západ narůstají až na 1800 mm ročně. Více než 80 % srážek vypadne v období od července do října (Kim et al. 2008).

Čtvrtým faktorem urychlujícím erozi a tím i degradaci je pak nevhodný způsob hospodářství, příkladem může být například orba po spádnici, či absence mezí, teras či jiných bariér.

Dalším negativním činitelem je intenzivní pastva hospodářské zvěře. V Etiopii je hospodářská zvěř zastoupena především skotem a kozami (Bishw 2009). Hospodářská zvěř spásá již tak řídkou vegetaci a dále ji ničí svými kopyty.

V Etiopii probíhá spousta rozvojových programů, které se snaží těmto negativním důsledkům zabránit. Jedná se především o vzdělávací aktivity místních obyvatel, kteří jsou vzděláváni v udržitelném zemědělství a jsou jim ukazována protierozní opatření. Mezi ty patří například: uzavírka rehabilitovaných území, konstrukce protierozních rýh/valů, konstrukce protierozních dřevokamenných hrázek, vytváření terasovitých polí, výsadba vegetace: stromy, keře, traviny.

Touto problematikou se zabývají celosvětově stovky autorů, to činí toto téma aktuální a zvyšuje tak zájem o něm, což dává Etiopii lepší vyhlídky do budoucna. V České republice bych upozornil především na práci organizace Člověk v tísni a Aquatest, které v Etiopii pracují již řadu let. Problematicou se, ale zabývají i studenti ve svých závěrečných pracích, například Zelendová 2005 nebo Krieglerová 2012.

3.2 Svahové pohyby v Etiopské vysočině

3.2.1 Svahové pohyby

Termín svahové pohyby nemá v literatuře jednotnou definici. Jednou z nejpoužívanějších je definice dle Varnese (1978), který definuje svahový pohyb jako: „Gravitační pohyb hornin, zeminy a půdy po svahu, který může nastat spontánně bez zřejmé spouštěcí události, stejně jako může být zahájen silnými dešti, zemětřesením nebo antropogenním ovlivněním a zásahem do struktury svahu.“ Varnes dále upozorňuje, že ve většině případů není svahový pohyb samovolný, ale je vyvolán právě nějakou spouštěcí událostí (triggerem).

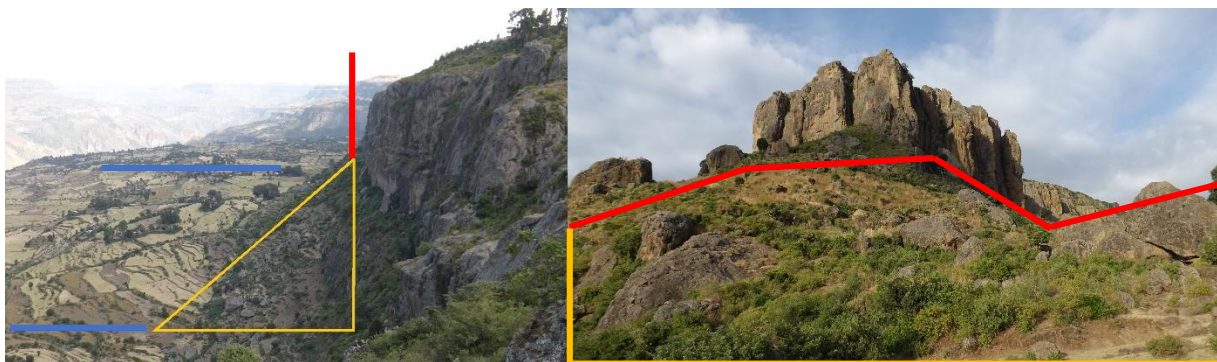
Dle Summerfielda (1991, str. 167) jsou svahové pohyby jedním z nejrozšířenějších environmentálních hazardů. Jedná se o pohyb materiálu dolů po svahu účinky gravitace, bez působení tekoucí vody, ledu nebo větru.

Svahové procesy se mohou dělit na základě mnoha kritérií: rychlost, svahový materiál, tvar, obsah vody, pohyb,... Nejpoužívanější je dělení svahových pohybů dle rychlosti, typu pohybu a svahového materiálu.

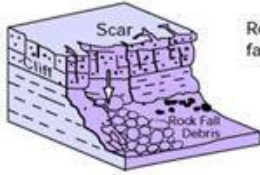
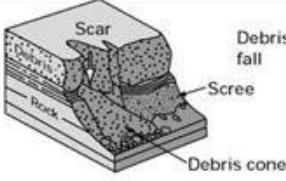
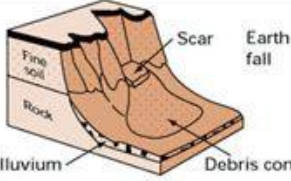
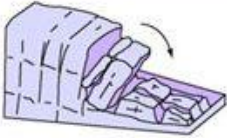
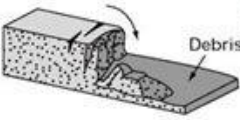
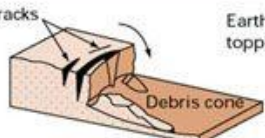

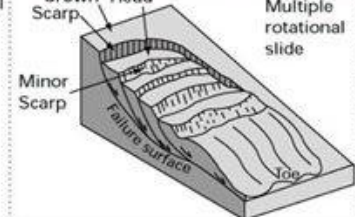
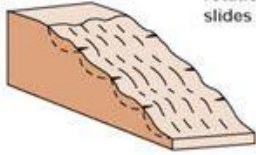
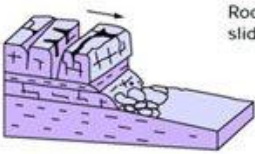
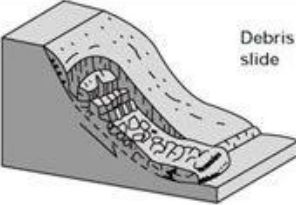
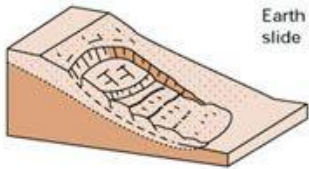
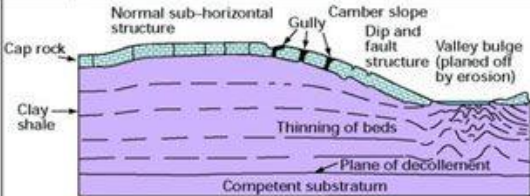
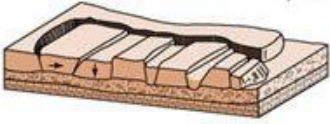
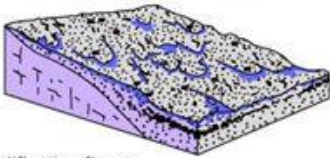
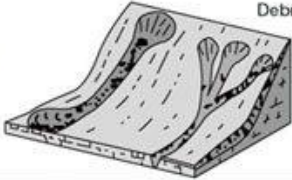

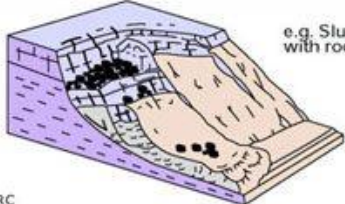
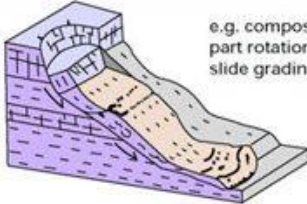
Na základě rychlosti dělí Demek (1988) svahové pohyby do tří skupin:

- pomalé dlouhodobé svahové pohyby (mm/rok až mm/den)
- rychlé svahové pohyby (mm/h až m/h)
- katastroficky rychlé svahové pohyby (m/h, km/h až 100 km/h)

Typy svahových pohybů jsou přehledně graficky znázorněna v následujícím schématu. Horní vodorovný pás představuje typ materiálu od konsolidovaných hornin až po nepevnou zeminu. Svislý vertikální pás pak typ svahového pohybu podle mechanismu pohybu: řízení, překlápění, sesuvy, propady, tečení a komplexní svahové pohyby.



Obrázek 5: Příklad řízení z oblasti, červeně je označená odlučná oblast, žlutě akumulční, modře úroveň terasy. Zároveň jsou zde dobře patrné změny sklonu, v odlučné oblasti přes 60°, v akumulční přes 20° a téměř rovná terasa.

Material		Movement type		
		ROCK	DEBRIS	EARTH
FALLS		 Rock fall	 Debris fall Scree Debris cone	 Earth fall Colluvium Debris cone
		 Rock topple	 Debris topple Debris cone	 Earth topple Debris cone
SLIDES	Rotational	 Single rotational slide (slump) Failure surface	 Multiple rotational slide Crown Scarp Head Minor Scarp Failure surface Toe	 Successive rotational slides
	Translational (Planar)	 Rock slide	 Debris slide	 Earth slide
SPREADS		 e.g. cambering and valley bulging		 Earth spread
FLOWS		 Solifluction flows (Periglacial debris flows)	 Debris flow	 Earth flow (mud flow)
COMPLEX		 e.g. Slump-earthflow with rockfall debris	 e.g. composite, non-circular part rotational/part translational slide grading to earthflow at toe	

Obrázek 6: Klasifikace svahových pohybů dle svahového materiálu a mechanismu pohybu dle Varnese (1978)

Popisem jednotlivých typů pohybu v této práci nebudu zabývat, protože takových publikací je mnoho. Pro základní představu postačí náčrtky v obrázku výše.

3.2.2 Předběžné faktory svahových pohybů v Etiopské vysočině

Pro studium svahových pohybů je velice důležitá znalost předběžných faktorů ve zkoumané oblasti. Předběžné faktory jsou nejčastěji vnímány jako fyzickogeografické charakteristiky oblast. Kombinace těchto faktorů může vyvolat svahový pohyb i bez jakéhokoli spouštěče. Mezi hlavní faktory se uvádí sklon, geologické podloží, vegetační pokryv, půdní vlastnosti nebo nadmořská výška. Významným činitelem je ale také člověk a působení, které tyto charakteristiky mění. Mezi hlavní antropogenní faktory patří například budování teras nebo deforestrace. Pro zjišťování těchto poměrů se nejčastěji používají metody dálkového průzkumu. Nicméně možnosti těchto metod pro výzkum svahových pohybů nebyly v 90. letech plně využívány (Mantovani et al. 1996).

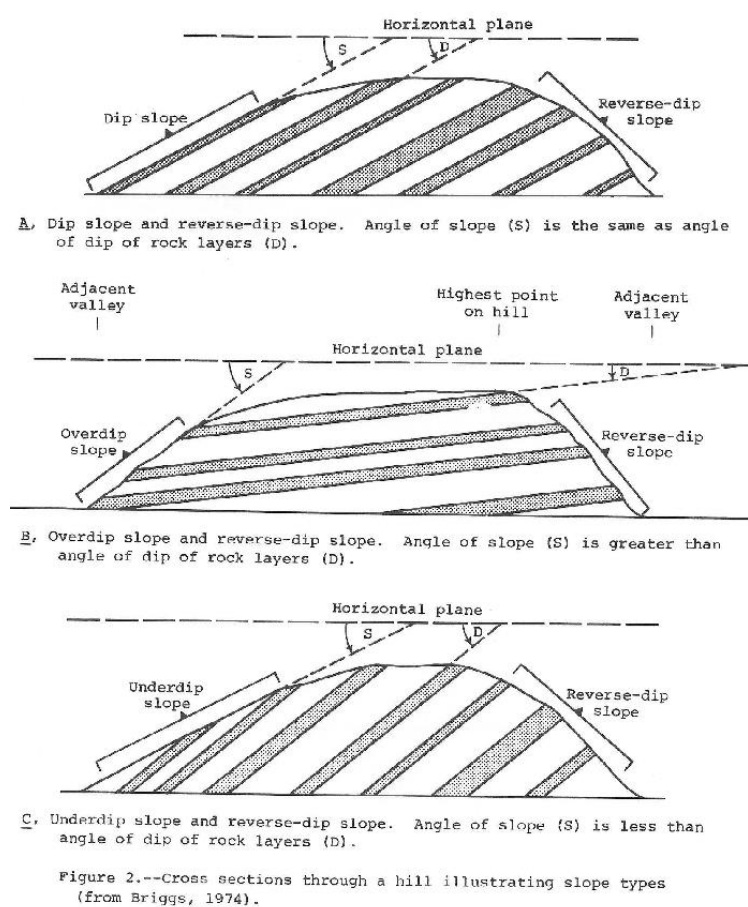
Geologické faktory

Vliv geologického podloží na výskyt sesuvů lze dle (Asfaw 2010) opět detailněji rozdělit do čtyř skupin: litologie, sekvence vrstev, úložné poměry vrstev a výskyt zlomů a puklin. Podobné faktory v rámci geologie vyznačil i např. Briggs (1974)

Litologie je zde chápána jako samotný popis horninového podkladu, tedy na jakém horninovém podkladu se v lokalitě nacházíme. Naprostá většina autorů se shoduje, že právě typ geologického podloží je hlavním faktorem ovlivňujícím výskyt svahových pohybů. Například Temesgen et al. (2001) ve své práci z oblasti Wondo Genet ukazuje na maximální frekvenci výskytu svahových pohybů na ignimbritech. Donati, Turrini (2002) poukazuje na vysoké frekvence výskytu na trachytech, ryolitových lávách a sedimentárních horninách. Spousta autorů se zaměřuje na zhodnocení výskytu jednotlivých typů svahových pohybů dle geologického podloží. Moeyersons et al. (2008) v oblasti Tigray prezentuje nejvyšší výskyt řícení na bazaltech. Stručný výčet těchto prací z oblasti Etiopské vysočiny je k nalezení v práci K. Schreiberové (2013).

Pořadí uložených vrstev je dalším faktorem ovlivňujícím výskyt svahových pohybů (Krejčí et al. 2002). Etiopská vysočina je území zasažené několika generacemi lávových proudů, které se vzájemně překrývají, nebo překrývají níže ležící druhohorní sedimenty (Kazmin 1975). Typickým příkladem vlivu nevhodné souslednosti vrstev z České republiky jsou západokarpatské flyšové sedimenty (Klimeš et al. 2009). V těchto druhohorně až třetihorních sedimentech dochází ke střídání propustných pískovců a nepropustných jílovců. K sesouvání dochází především v důsledku sycení vrstev vodou a jejich následnému gravitačnímu pohybu po nepropustné vrstvě. V oblasti Etiopské vysočiny funguje mechanismus na podobném principu. Temesgen et al. (2001) popisuje svahové pohyby odstartované silnými srážkami v oblasti Wondo Genet. Svrchní vrstva ignimbritů zde leží na rozlámaných a silně zvětralých bazaltech, které se při srážkách výrazně nasytí vodou.

Nevhodná kombinace sklonu a orientace vrstev ve vztahu ke svahu může vést ke zvýšenému výskytu svahových pohybů. (Cruden, Hu 1996). Na základě vztahu uložených vrstev a parametrech svahu dělí Briggs (1974) svahy do čtyř kategorií (viz ilustrace níže). Pro výskyt svahových pohybů je nejvhodnější situace s tzv over-dipem (B), kdy sklon svahu je větší než sklon podložních vrstev. V tomto případě zvrstvení podložních vrstev neposkytuje svahu žádnou oporu. Dip, under-dip a reverse-dip jsou naproti tomu relativně stabilní formy. Tento faktor nemusí být v přírodě zřetelný a je jedním z možných vysvětlení proč se na zdánlivě stejných svazích liší výskyt svahových pohybů. Typickým příkladem v České republice je například lokalita Šance – Řečice. Sesuvná oblast se nachází v jižním svahu bočního údolí vodní nádrže Šance vybudované na řece Ostravici. „Masarykovo“ údolí bylo vytvořeno pravostranným přítokem potoka Řečice a po napuštění nádrže v r. 1969 zčásti zatopeno. K sesouvání dochází především v důsledku sycení vrstev vodou z nádrže. Vrstvy jsou na jižním svahu nepříznivě ukloněny po svahu směrem do údolí, zatímco na protější stráni zapadají do svahu a ke vzniku sesuvů nedochází (Mrvík 2006). Nicméně literatura se ve zhodnocení vlivu tohoto faktoru liší (porovnání Atkinson, Massari 1998, Donati, Turrini 2002 vs Carrara et al. 1991, D'Amato Avanzi et al. 2004). Pro zhodnocení tohoto vlivu je nutný dostatek kvalitních dat, což často vede k tomu, že tento faktor není do analýz zahrnut.



Obrázek 7: Typy svahů na řezu elevací, převzato z Briggs 1974

Varnes (1984) uvádí, že stupeň rozlámání hraje významnou roli v nestabilitě svahu. Zlomové zóny a pukliny představují oslabená místa v hornině a dochází zde k intenzivnějšímu působení eroze, navíc se těmito nespojitými deformacemi dostává do podloží voda. Z důvodu výskytu Etiopského riftového systému je oblast Etiopské vysočiny místem s vysokým počtem zlomů a puklin. Asrat et al. (1997), Abebe et al. (2010), Schneider et al. (2008) tvrdí, že výskyt svahových pohybů v Etiopské vysočině je spojen s hluboce uloženými strukturálními deformacemi.

Geomorfologické faktory

Mezi hlavní geomorfologické faktory ovlivňující výskyt svahových pohybů se řadí sklon svahu, jeho orientace a tvar.

Jelikož svahový pohyb je definován jako pohyb materiálu dolů po svahu účinky gravitace (Summerfield 1991, str. 167), pak s nárůstem sklonu svahu bude růst i gravitační síla působící na svahový materiál a tím bude narůstat i možnost svahového pohybu. Asfaw (2010) to potvrzuje tvrzením, že s narůstajícím sklonem narůstá i smykové napětí (s), které působí dolů po svahu. Naproti smykovému napětí působí smykový odpor (o). Pohyb nastává, pokud velikost smykového napětí překročí velikost smykového odporu, jejichž rovnováha určuje mez bezpečnosti svahu. Podle poměru smykového odporu a napětí můžeme jednotlivé svahy rozdělit do tří kategorií (Summerfield 1991):

- svahy stabilní ($s < o$)
- svahy aktivně nestabilní ($s > o$)
- svahy podmíněčně nestabilní ($s < o$ nebo $s > o$)

Clerici et al. (2002), tvrdí, že sklon svahu je běžně považován za nejvýznamnější faktor stability svahu napříč prakticky všemi pracemi zabývajícími se hodnocením svahových pohybů, což potvrzují např. Woldearegay (2013), Ayalew, Yamagishi (2004) Ayenew, Barbieri (2005) nebo Broothaerts et al. (2012) zjištěním, že nejvyšší množství svahových pohybů se jednoznačně vyskytuje na svazích s vysokých sklonem.

Orientace svahu může také ovlivňovat výskyt svahových pohybů (Dai, Lee 2002). Například Broothaerts et al. (2012) na lokalitě Gilgel Gibe poukazuje na významně vyšší výskyt svahových pohybů na svazích se severo-západní a severo-východní orientací. Nicméně autoři zároveň dodávají, že neví, čím je tento fenomén způsoben. Každá lokalita má jedinečné podmínky a kombinace faktorů vedoucí ke svahovým pohybům není jednotná. Pro posouzení potenciálního ohrožení svahovými pohyby je nutná znalost ovlivňujících faktorů pro daný svah nebo oblast. (Metternicht et al. 2005). Proto rozhodně nelze tvrdit, že svahové pohyby mají obecně vyšší výskyt na svazích s danou orientací.

Land Use, Land Cover

Data landuse a land cover jsou někdy zahrnována jako faktor ovlivňující nestabilitu svahů (Asfaw 2010, Van Westen 1997a, Clerici et al. 2002). Začlenění tohoto faktoru do modelu náchylnosti však není tak časté. Zahrnutí do analýzy bývá obtížné, protože se jedná o kvalitativní data, která nelze jednoduše transformovat do kvantitativních. Například v případě geologických faktorů, kde je situace podobná, je transformace jednodušší.

Zejména vegetační pokryv jako takový bývá významným činitelem podporujícím stabilitu svahu. Vegetační pokryv působí stabilizačně především díky svým kořenům, které zpevňují půdní pokryv. Zvláště pak kořeny stromů, které dosahují i větších hloubek tvoří jakousi opěrnou kostru. Stabilizační účinek kořenů může chránit svah před výskytem mělkých svahových pohybů, neposkytuje však dostatečnou oporu před hlouběji založenými svahovými pohyby (Woldearegay 2013). Problematika změny krajinného pokryvu a landuse je podrobněji diskutována níže.

Antropogenní faktory

Vliv lidských aktivit, například intenzivní zemědělská činnost, těžba, stavba silnic, urbanizace, změny landuse a další jsou také faktorem ovlivňujícím stabilitu svahu a ohrožení svahovými pohyby (Ayalew 2000, Nyssen et al. 2003). Tato problematika úzce souvisí s vysokou rychlostí deforestrace v Etiopii. Vegetací nezpevněné oblasti mají vyšší infiltraci, což se projeví větším počtem svahových pohybů. Také konstrukční práce mohou zvyšovat náchylnost ke svahovým pohybům například nadměrným zatěžováním svahu či otřesy při samotné práci. Varnes (1978) tvrdí, že modifikace svahů může výrazně ovlivňuje jejich stabilitu. Nicméně jednoznačně největším problémem je zmíněná deforestrace a odstraňování vegetačního pokryvu. Její příčiny jsou různorodé (zábor půdy, konstrukční účely, palivo,...). Co se týká zemědělství, tak na většině území nejsou aplikovány principy udržitelného hospodaření. Naprosto běžná je orba dlouhých polí směrem po spádnicí, místní zemědělci nebudují meze, pro přerušení svahu. Důsledkem je potom rapidní úbytek půdy v období dešťů, především v horní části svahu, která se kumuluje v dolní části nebo je odnesena úplně. Takto degradovaná pole plná hlubokých koryt a strží jsou opuštěna a zemědělci se přesouvají dále.

3.2.3 Spouštěcí faktory (triggery) svahových pohybů v Etiopské vysočině

Jako spouštěcí faktory nebo události, běžně označované jako triggery se řadí například: seismická činnost, srážky, nebo říční eroze. Jak již bylo zmíněno, k vyhodnocení předběžných faktorů se běžně používají metody dálkového průzkumu. V případě spouštěcích faktorů/událostí není využití metod dálkového průzkumu tak jednoduché, nicméně se to stává aktuální, viz např. Kniveton et al. (2000), Buchroithner (2002), Huggel et al. (2002).

Seismicita

Seismická činnost je jedním z možných spouštěčů svahových pohybů. Zemětřesení může vyvolat svahový pohyb i na svahu, který byl předtím stabilní. Při otřesech dochází k přeuspořádání částic půdy, což může vést až k pohybu (Asfaw 2010). Nicméně i přes bohatý výskyt zemětřesení v Etiopii je tento spouštěcí faktor spíše druhotným a nemá na výskyt svahových pohybů velký dopad (Woldearegay 2013).

Srážky

Vliv srážek je v Etiopii uváděn jako nejčastější spouštěcí faktor pro svahové pohyby. Nestačí však jenom velké roční srážkové úhrny, ty jsou dosahovány i v jiných oblastech světa, např. v Irsku. Ale důležitá je kombinace velkých úhrnů a jejich koncentrace do kratšího časového úseku. Pokud by srážkový úhrn byl rovnoměrně rozložen na období celého roku, dopad na spouštění svahových pohybů by byl značně menší. Důležité pro odstartování svahového pohybu je rychlé a intenzivní nasycení. Voda infiltrující do horninového prostředí sytí zeminy a hmotnost vrstvy narůstá. Dočasně se zvyšuje pórový tlak a snižuje se pevnost ve smyku. Dalším nepřímým vlivem těchto srážek je intenzivní nárůst průtoků a vodních stavů ve vodních tocích, tento mechanismus spouštění svahových pohybů je popsán níže.

Klimatické podmínky Etiopské vysočiny byly popsány v vodní části a přesně odpovídají popisovanému mechanismu. Více než 80 % srážek zde vypadne v období od července do října (Kim et al. 2008).

Temesgen et al. (2001) např. popisuje svahové pohyby odstartované silnými srážkami v oblasti Wondo Genet. Také Ayenew, Bariberi (2010) tvrdí že srážky jsou v Etiopské vysočině nejvýznamnějším spouštěcím faktorem pro svahové pohyby. Stejně zjištění udává i Abebe et al. (2010). Kvantifikaci vlivu srážek na výskyt svahových pohybů v Etiopské vysočině předkládá Ayalew (1998), která podrobil tyto proměnné regresní a korelační analýze a zjistil mezi nimi významnou korelaci ($r=0.85$).

Říční eroze

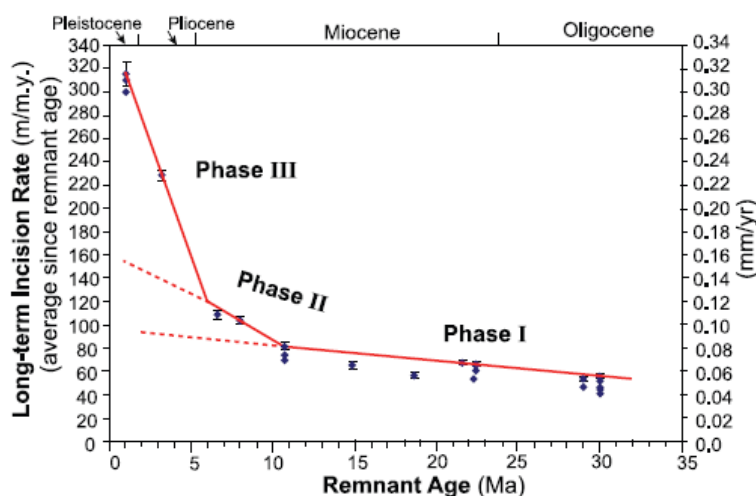
Říční eroze v Etiopské vysočině dosahuje obrovských rozměrů. Je to způsobeno kombinací několika faktorů: nepevněné sedimenty, sezónní srážky, prudké svahy. Říční erozi můžeme rozdělit na boční erozi koryta, hloubkovou erozi na dně a zpětnou erozi.

Zpětná eroze není svými důsledky tak výrazná jako zbývající dva typy. Významněji se projevuje pouze v těch částech koryta, kde dochází k významné změně ve spádu – například u vodopádů. Padající voda podemílá spodní část vodopádu, až dojde k odlomení horní hrany. Vodopád se tímto způsobem posunuje směrem nahoru po toku k prameni. Tento proces je typický především pro horní části toků (Gani et al. 2007).



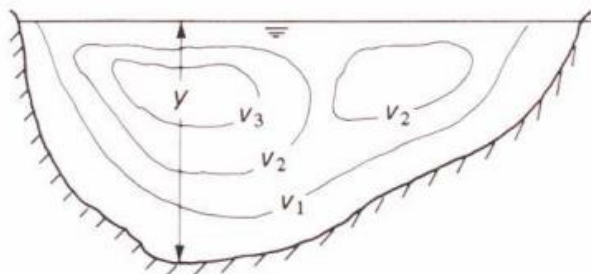
Obrázek 8: Příklad zpětné eroze na Modrém Nilu

Hloubková eroze je zodpovědná za zahlubování říčního toku do podloží. Zařiznutí říčních toků v severní části Etiopské vysočiny kolísá od 0 do 1600 m, přičemž se hloubka zařiznutí snižuje s postupem proti proudu toku. Hloubková eroze zvyšuje výskyt svahových pohybů, protože jejím prostřednictvím dochází k remodelaci koryta a následně ke zvýšení sklonu údolí. Tyto dopady jsou zřetelné například na příčných řezech údolím (Maca 2011). Většina toků v oblasti má úzká zařízlá koryta do tvaru V (Ayalew 1999, Broothaerts et al. 2012, Gani, Abdelsalam 2006). To je způsobeno tím, že vodní toky v Etiopské vysočině prodělaly několik epizod rychlého zahlubování, které bylo způsobeno především intenzivním tektonickým výzdvihem, který dále trvá (Gani et al. 2009). Rychlost zahlubování toku je dále ovlivněna odolností hornin v podloží (Gani, Abdelsalam 2006).



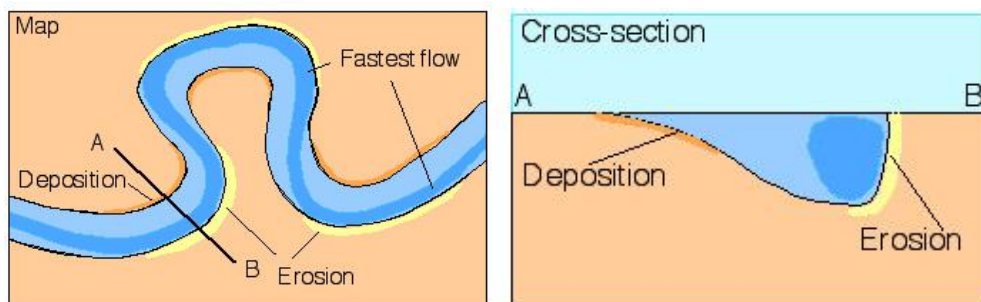
Graf 1: Vývoj míry zahlubování od doby před 30 miliony let. Na svislé ose jsou vyznačeny míry zahlubování v metrech za milion let, resp. milimetrech za rok, na vodorovné ose jsou vyznačeny časové údaje. Převzato z Gani et al. 2007, str. 7.

Boční eroze je nejvýznamnější činitel z pohledu svahových pohybů. Z důvodu nerovnosti koryta je také rychlost proudění vody v něm nerovnoměrná.



Obrázek 9: Příklad znázornění rychlostí v říčním korytě, Zdroj: web.natur.cuni.cz

V místech, kde je nejvyšší rychlost proudění vody, je také nejsilnější eroze. V případě, že máme meandrový tok, je nejsilnější eroze na tzv. výsepním (konkávním) břehu, naopak sedimentace na jesepním (konvexním).



Obrázek 10: Říční meandr s vyznačenými body s nejintenzivnější erozí a ukládáním. Bod A představuje místo jesepní (konkávní) břeh, bod B výsepní (konvexní) Zdroj: <http://www.gly.uga.edu/>

Vodní tok eroduje boční stranu koryta a tím odebírá podpůrnou vrstvu výše ležícím vrstvám, což vyvolá gravitační pohyb. Boční eroze způsobuje nestabilitu svahu dokonce i u svahů nízkým sklonem (Broothaerts et al. 2012).

Dle Zezere et al. (1999) a jejich výsledků z Portugalska je intenzivní boční eroze zodpovědná nárůst počtu svahových pohybů. Boční erozi jako klíčový faktor uvádí také např. Larsen, Montgomery (2012). Z oblasti Etiopské vysočiny pak dle výsledků Broothaerts et al. (2012) téměř všechny svahové pohyby na svazích s nízkým sklonem na lokalitě Gilgel Gibe byly v blízkosti vodního koryta.

3.2.4 Svahové pohyby v Etiopské vysočině

Svahové pohyby jsou v celé Etiopii vážným tématem. V období od roku 1993 do roku 1998, bylo v Etiopii svahovými pohyby zničeno více než 200 domů, více než 500 km silnic poškozeno a kolem 300 lidí bylo zabito. (Ayalew 1999). Náchylnost Etiopie ke svahovým pohybům je dle Glade and Crozier (2005)

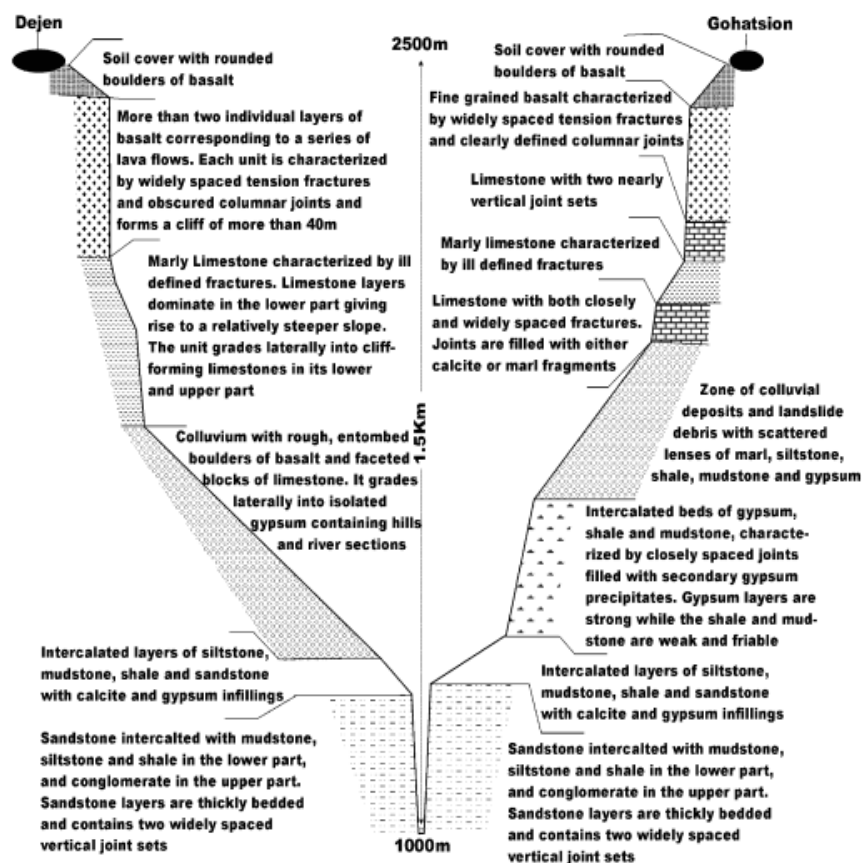
způsobena kombinací prudkých svahů, vysokých sezónních srážek, narůstající husté populace, deforestace a výskytu zemětřesení. Špatná infrastruktura a absence kvalitních monitorovacích systémů ještě zvyšuje nebezpečnost těchto procesů. A to i přesto, že svahové pohyby jsou považovány za procesy poměrně dobře predikovatelné (Hansen 1984).

Výzkumů zabývajících se svahovými pohyby v Etiopské vysočině je opravdu spousta. Obsáhlý přehled výzkumů dle lokalit předkládá Woldearegay (2013). Mezi tyto lokality patří například: lokalita Dessie (oblast verifikace navrženého modelu), údolí Modrého Nilu, oblast Tigray, okolí řeky Tekeze.

Dejen-Gohatsion

Velmi dobře popsanou lokalitou v oblasti Etiopské vysočiny je údolí Modého Nilu mezi městy Dejen a Gohatsion, geologicky známá jako Dejen-Gohatsion formace. Tato formace se nachází přibližně 100 km severozápadně od méj zájmové lokality Portugalský most. Výzkumem svahových deformací zde se zabývají především autor Lulseged Ayalew s kolegy: Ayalew (1999, 2000), Ayalew and Yamagishi (2002, 2003), Ayalew and Temesgen (1995), dále pak například Almaz (1998) nebo Ayele et al. (2014). Touto lokalitou se také zabývala Kateřina Schreiberová ve své bakalářské práci (Schreiberová 2014).

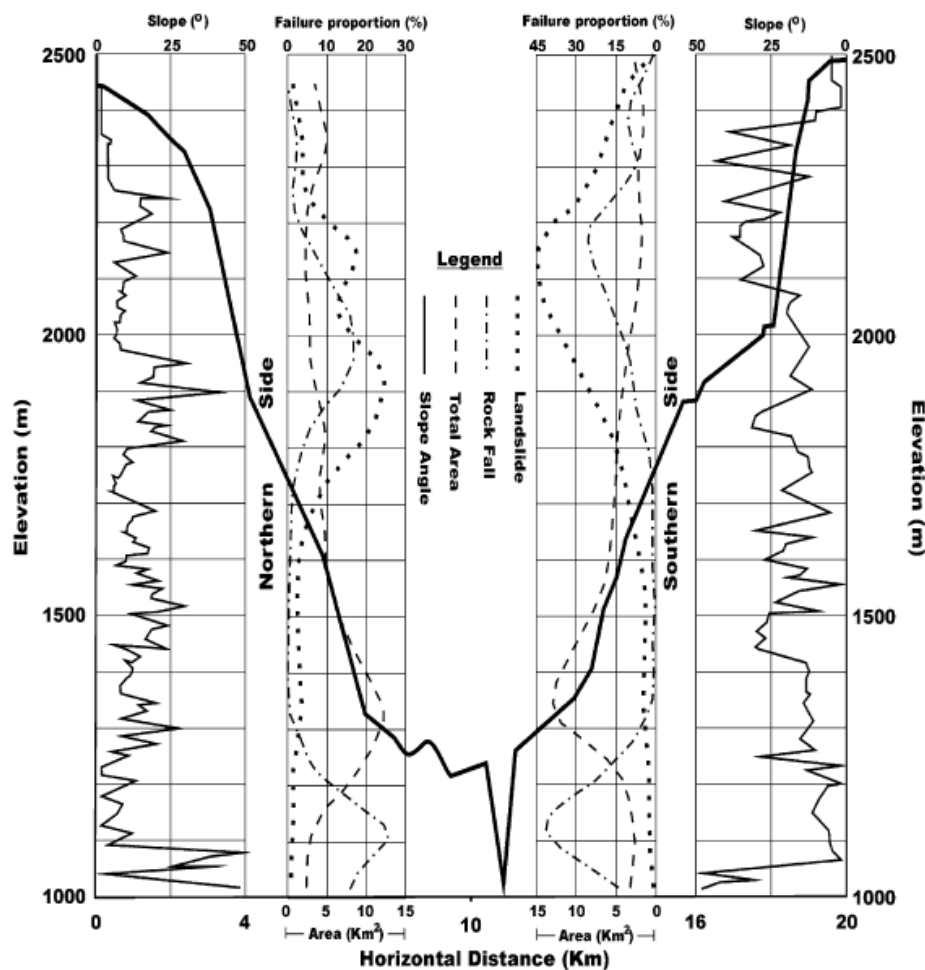
Tato lokalita se nachází v centrální části Etiopie zhruba 200 kilometrů severně od hlavního městar. Lokalita se označuje podle dvou významných měst, které se nacházejí na opačných stranách koryta Modrého Nilu přibližně 25 km od sebe. Modrý Nil má v této oblasti hluboce zaříznuté koryto, s převýšením až 1500 m (Maca 2012). Toto zaříznutí je způsobeno výzdvihem celé oblasti, který v kombinaci s vhodnou geologickou strukturou výrazně urychlil probíhající erozi (Gani et al. 2007). V této oblasti se vyskytují převážně druhohorní vrstvy sedimentárních hornin, které byly překryty třetihorními bazalty (Mohr 1983, Mohr, Zanettin 1988). Druhohorní horniny jsou typické téměř horizontálním zvrstvením, reprezentující jednotlivé epizody sedimentace. Mocnost těchto málo odolných sedimentů je zde vyšší než 1 km (viz obr). Eroze byla ze začátku pomalejší vlivem odolných bazaltů ve vrchní části údolí, nicméně jakmile řeka překonala tuto vrstvu a dostala se do málo odolných vápenců, eroze byla výrazně urychlena. Výsledkem je strmé terasovité koryto Modrého Nilu, které je ideálním místem pro výskyt svahových pohybů.



Obrázek 11: Příčný řez údolím Modrého Nilu v oblasti Dejen-Gohatsion, převzato z Ayalew, Yamagishi 2003

Jak již bylo zmíněno, touto lokalitou se zabývá několik autorů. Například z výsledků práce Ayele et al. (2014) vyplívá, že nejvýznamnějším faktorem ovlivňujícím svahové pohyby v této lokalitě je geologické podloží. Z jeho modelu pak vyplívá, že největší ohrožení je v oblastech na vápencích a nezpevněných sedimentech. Dalším zjištěním je vyšší míra ohrožení v horních částech svahu.

Podobné avšak podrobnější výsledky předkládají Ayalew, Yamagishi 2003, kteří předkládají distribuci svahových pohybů dle typu v rámci údolí a s ohledem na tvar svahu. Sesuvy se dle nich nevyskytují v dolní části svahu, naopak jich přibývá s narůstající nadmořskou výškou. Skalní řízení se vyskytují ve vyšších částech svahu a na pískovcových útesech. Maxima výskytu svahových pohybů je ve výškách mezi 1900 a 2200 m. V těchto výškách se nachází rozhraní mezi druhohorními níže ležícími vápenci překrytými terciárními lávami. To je způsobeno vysokou perkolací skrz bazalty do málo odolných vápenců. Ve výškách přes 2200 metrů naopak svahových pohybů výrazně ubývá z důvodu snižování sklonu a srovnávání reliéfu viz obr.



Obrázek 12: Sklonitost svahů a distribuce jednotlivých typů svahových pohybů v údolí Modrého Nilu v lokalitě Dejen-Gohatsion

Tito autoři poukazují také na to, že nebyla prokázána žádná závislost mezi orientací svahu a počtem svahových pohybů. Dále rozebírají vazbu mezi sklonitostí a jejich výskytem. Sesuvy se vyskytují na sklonech mezi 10 a 35°, na nižších sklonech pak převažují ploužení a na sklonech přes 40° dominují odlamování a řícení.

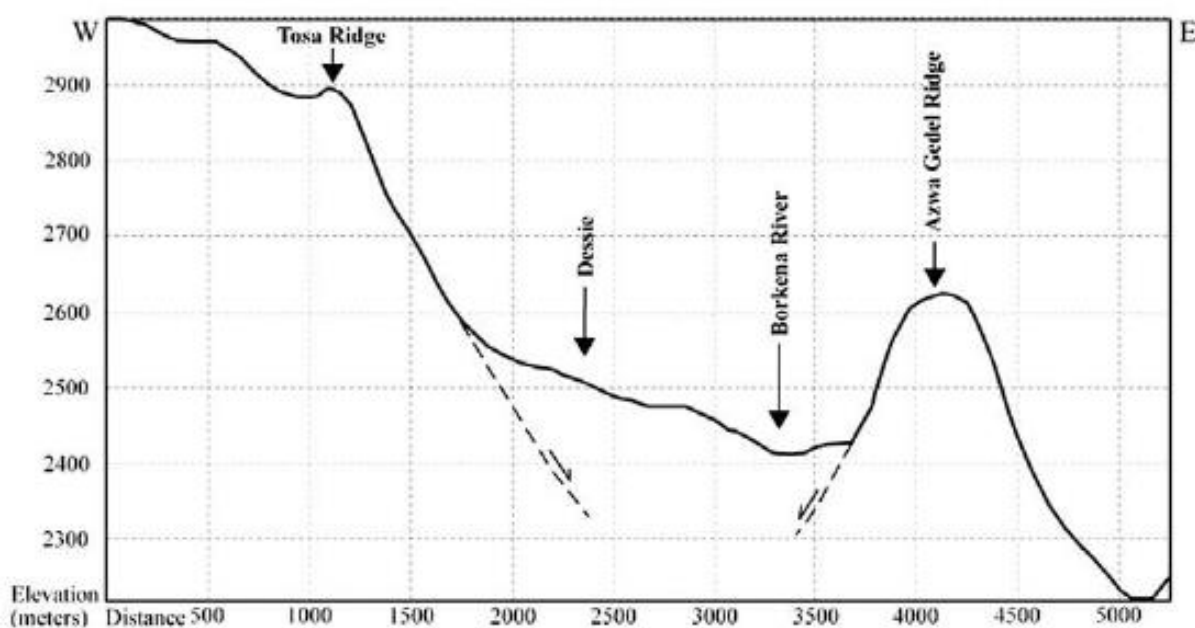
Dle bakalářské práce K. Schreiberové (2014) je v této lokalitě největší výskyt skalních řícení a proudových pohybů.

Ayalew (2000) ve své práci prezentuje vysokou náchylnost k rychlým svahovým pohybům (řícení, odlamování) v oblastech vysoce odolných hornin (bazalty, ignimbrity), které jsou porušeny puklinami, což tvrdí i Ayalew, Yamagishi (2003).

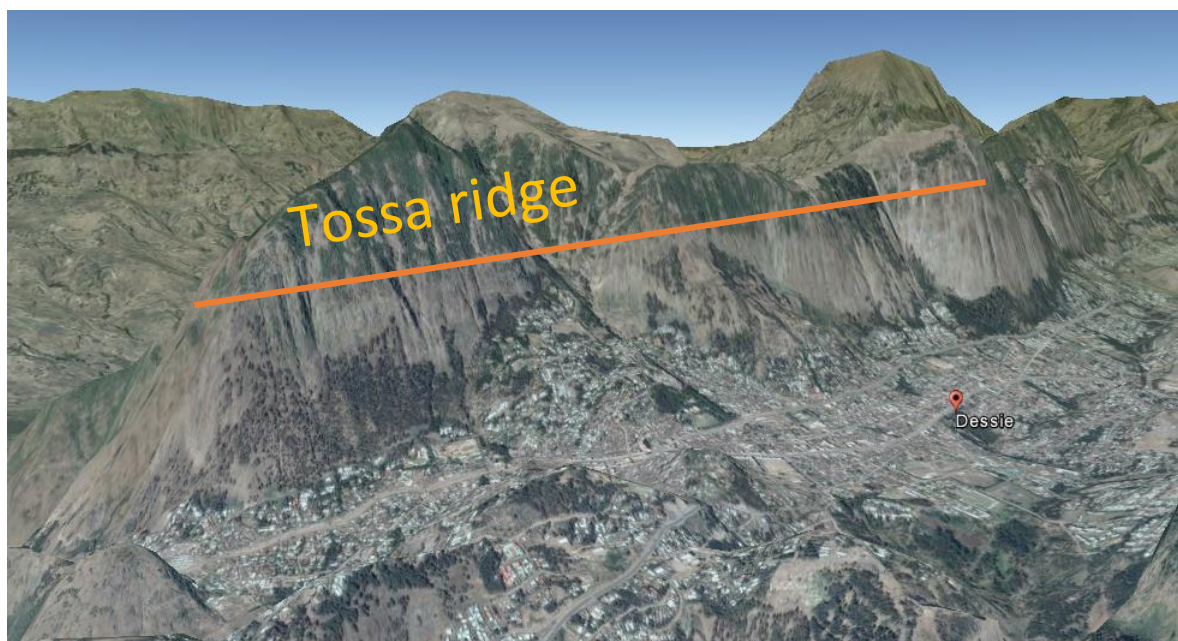
Dessie

Lokalita Dessie leží přibližně 400 km na sever od hlavního města v nadmořské výšce zhruba 2500 m. V této lokalitě je opět významným faktorem topografie, především na západě se rozkládající strmý hřeben Tossa (Tossa ridge) s nadmořskou výškou 3000 m. Nejvyšší partie tohoto hřebenu jsou tvořeny

třetihorními bazalty a ignimbrity. Dalším významným prvkem je hřeben Azwa Gedel na východě. Většina řek v této oblasti začíná na západě právě v hřebeni Tossa a teče směrem na východ skrze město Dessie. Většina toků zde vytváří hluboce zařízlá koryta a strže. Níže po tocích dochází k významnému snižování spádu a řeky zde ukládají sedimenty. Zároveň většina svahových pohybů v zde je orientována tímto východo-západním směrem a jsou vázány právě na tyto hluboké strže. Co se týká plošného vymezení, největší frekvence výskytu je v oblastech s nejvyšší sklonitostí na západ od města a ve svazích elevace na východě (Abebe et al 2010). Nejčastějším typem jsou mělké sesuvy, ploužení a blokovo-bahenní proudy. Sesuvy a ploužení jsou zde vázány na nepevněné sedimenty. Dalším častým místem výskytu jsou oblasti s vrstvami bazaltů, mezi kterými jsou uvězněny vrstvy nepevněných sedimentů na příkrých svazích se sklonem 60-85° (Ayenew, Bariberi 2005, Fubelli et al. 2008). Sklaní říční se zde vyskytuje ojediněle ve vyšších partiích svahu na bazaltech, často se jedná odlamování menších úlomků, ze kterých vznikají debris flow (Fubelli et al. 2013). Podobně se k těmto výsledkům vyjadřuje také Schreiberová (2014).



Obrázek 13: Příčný řez lokalitou Dessie, převzato z Abebe et al. 2010



Obrázek 14: Pohled na hřeben Tossa na západ od města Dessie

Gilgel Gibe

Tato lokalita leží v jižní části Etiopské vysočiny, zhruba 400 km jižně od Addis Abeba v nadmořské výšce kolem 2500 m. Tato oblast je známá především díky významným hydroelektrárnám (Gilgel Gibe I-III), jejichž výstavba byla a je doprovázena protesty spojenými s vlivem přehrad na přírodní podmínky a místní obyvatele. Popisem této lokality s ohledem na svahové pohyby se zabývá pouze kolektiv autorů s Gentské university ve spolupráci s Universitou v etiopské Jimmě v rámci Soil Fertility Projectu (Broothaerts et al. 2012, Schelstreate 2010).

Co se geologického podkladu týče, celá oblast (14 km²) se nachází na třetihorních až kvartérních vulkanických horninách. Dominantní jsou rhyolity, trachyty a ignimbrity. Celkem v této lokalitě bylo vymapováno 60 svahových deformací. Průměrný objem přemístěného materiálu je zhruba 20 000 m³, nejmenší pouhých 20 m³ a největší 250 000 m³ materiálu. Broothaerts et al. (2012) upozorňuje na absenci výskytu skalních řícení, která se jinak v Etiopské vysočině běžně vyskytují. Většina deformací byla tvořena úlomky (debris). Nejčastěji zastoupenými pohyby v této oblasti byly sesuvy. Významným zjištěním je, že většina sesuvů se nachází v blízkosti vodního toku a statisticky je to také nejvýznamnější faktor ovlivňující výskyt svahových pohybů v této oblasti. Podrobnější analýzu vybraných sesuvů (4) v této oblasti předkládá Schelstreate (2010) ve své diplomové práci, kde detailně rozebírá půdní vlastnosti v různých částech sesuvu. Na základě těchto výsledků prezentuje mechanismus vedoucí ke svahovému pohybu. Jedná se o již dříve popsany pohyb vodou saturované vrstvy po nepropustné jílové vrstvě.

Portugalský most - Jemma

Zájmová lokalita povodí řeky Jemmy je již dlouhou dobu společným tématem česko-etiofských výzkumů, ty v této oblasti probíhají již od počátku 80. let (aquatest.cz). Významným milníkem je rok 2006, od kterého zde probíhá komplexní výzkum zaměřený na management vodních zdrojů. V rámci tohoto projektu byly provedeny také základní mapovací práce a vznikly tak např. podrobné geologické mapy, hydrologické mapy, mapy landuse, ale především mapy náchylnosti k rizikovým procesům (Šíma et al. 2009) a dále také (Zvelebil et al. 2010). Bohužel tato oblast je výhradní zájmovou oblastí pouze česko-etiofských výzkumů a neexistuje tedy žádná další literatura o této lokalitě věnující se svahovým pohybům. Výsledky mapování svahových pohybů z této lokality jsou v této práci popsány v následujících kapitolách.



Obrázek 15: Pohled do údolí ve zkoumané oblasti

4. Náchylnost ke svahovým ohrožením v Etiopské vysočině

Přírodní ohrožení je přírodní proces charakterizovaný velikostí, frekvencí, délkou trvání, plošným rozsahem, rychlostí nástupu, prostorovým rozptřením a časovým intervalem, který může způsobit škody. Podobným pojmem je přírodní katastrofa, což je extrémní projev přírodních procesů a jejich interakce se společností. V této definici je důležité upozornit na interakci se společností. (Kukal 1983)

Následky přírodních katastrof můžeme rozdělit na:

1. Primární

- Jsou vyvolány přímým působením přírodního procesu, například zatopení následkem povodně, tsunami,...

2. Sekundární

- Jsou vyvolány následně, nejsou přímo vyvolány procesem, například výpadky dodávek energie, požáry, epidemie,...

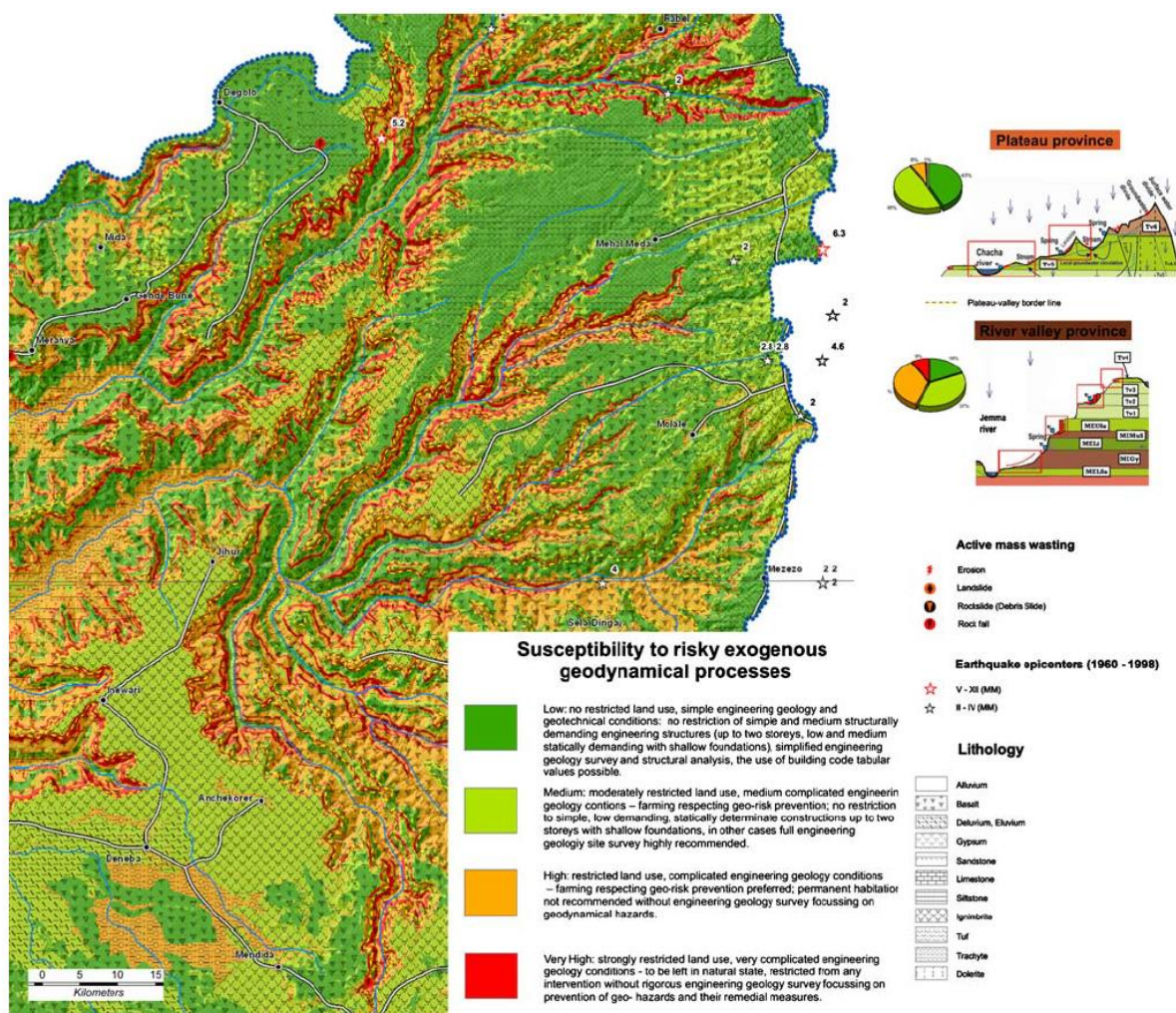
Dalším pojmem je zranitelnost, která je definována jako náchylnost ke vzniku škody. Větší zranitelnost méně vyspělých společností (technicky či organizačně) při dopadu přírodních katastrof je zřejmá (Vilímek in Langhammer 2007), rozdíly mezi nimi jsou však obrovské. Dle Freemana a dalších (2003) téměř 96 % úmrtí při povodních, svahových pohybech a dalších přírodních katastrofách se vyskytlo v zemích třetího světa. Tento hrozivý rozdíl ilustrují také údaje z UNDP (United Nations Development Programme). Podle kterých žije z celkového počtu ohrožených obyvatel na Zemi v nejchudších rozvojových zemích jen 11 %, ale na počtu úmrtí po přírodních katastrofách se podílejí 53 %. Naproti tomu je v hospodářsky nejvyspělejších státech vystaveno přírodním ohrožením 15 % obyvatel z celkového počtu a po katastrofách jich umírá pouze 1,8 %. Pro snížení počtu úmrtí vlivem přírodních katastrof proběhla již v 90. letech takzvaná Mezinárodní dekáda za snížení dopadu přírodních katastrof, která po ukončení v roce 1999 podnítila vznik několika dalších projektů a aktivit. Například ISDR (International Strategy for Disaster Reduction). ISDR vytvořilo šest cílů, kterých by mělo být dosaženo:

1. Zvýšit veřejné povědomí k porozumění podstaty přírodních rizik, zranitelnosti společnosti a snížení přírodních ohrožení.
2. Realizovat snižování následků přírodních katastrof prostřednictvím příslušných institucí.
3. Stimulovat multidisciplinární spolupráci včetně budování komunikačních sítí za účelem snižování míry rizik.
4. Zlepšovat vědecké znalosti o příčinách přírodních katastrof stejně tak jako o souvisejících technologických či environmentálních ohroženích a jejich vlivech na lidskou společnost.
5. Pokračovat v mezinárodní spolupráci za účelem snižování nepříznivých vlivů globálních změn klimatu, fenoménu El-Niño apod.
6. Posilovat kapacity pro vytváření systémů včasného varování



Obrázek 16: Příklad umístění vesnice přímo pod několika sesuvy, červeně sesuvy, žlutě obydlená oblast

Tyto aktivity přirozeně vedou k pravidelnému sledování katastrof a jejich plošnému rozložení. Z bodu 6 vyplívá i nutnost jejich predikování a právě proto začali vznikat modely, které si dávají za cíl určit místa, kde se tyto jevy vyskytují nejčastěji. Tedy, kde pravděpodobnost výskytu toho jevu je nejvyšší. Tyto modely vznikají často jak výsledek průniku předběžných faktorů a spouštěčů. Tyto faktory již podrobněji popsány v předchozí kapitole. Průběh a vstupy těchto modelů se dělí do několika skupin, které jsou popsány níže. Jejich výsledkem jsou ale vždy mapy náchylnosti.



Obrázek 17: Příklad mapy náchylnosti z povodí Jemmy, převzato ze Zvelebil et al. 2010

Mapy náchylnosti a zranitelnosti jsou většinou rozděleny do několika zón, dle pravděpodobnosti výskytu daného jevu. Dle Varnese (1984) by se mělo jednat o dělení části povrchu v homogenní oblasti na základě jejich pořadí (rankingu) odpovídajícímu stupni aktuálního nebo potenciálního ohrožení způsobeného svahovými pohyby.

Velkým odborníkem v této oblasti je holanďan Cees van Westen, který spolu se svými kolegy (Soeters, van Westen 1996; van Westen et al. 1997a) vytvořil klasifikaci modelů na hodnocení ohrožení svahovými pohyby. Dělí je na: inventární, heuristické, statistické a deterministické. Touto problematikou se v Čechách zabývá např. J Klimeš (Klimeš 2003, Klimeš 2007

Heuristické modely přistupují k problematice globálně na základě odborného zhodnocení potenciálu svahových pohybů z dat o předběžných faktorech. Příkladem zastánce tohoto přístupu je například Barredo et al. (2000).

Statistický přístup, někdy označován také jako stochastický pracuje s multidimenzionální množinou dat o charakteristikách reliéfu, na kterém v minulosti docházelo ke svahovým pohybům (Carrara et al.

1991, Lorente et al. 2002), přesnější modely dávají jednotlivým proměnným váhy, dle jejich důležitosti s ohledem na svahové pohyby (Donati, Turrini 2002; Lin et al. 2002; Lineback Gritzner et al. 2001). Tyto komplexní statistické metody, ale vyžadují velký soubor geografických dat, aby mohlo být dosaženo spolehlivých výsledků (Baredo et al. 2000). Zhou et al. (2002) uvádí, že tato metoda je nejvhodnější pro predikci svahových pohybů ve středním měřítku (1 : 50 000). Tato metoda se často používá pro zhodnocení vztahu mezi svahovými pohyby a faktory je způsobující. Díky tomu nám poskytuje více informací o mechanismu jednotlivých pohybů a je velmi vhodná pro predikci budoucích svahových pohybů a hodnocení ohrožení těmito pohyby.

Deterministický přístup (procesně orientovaný) je specifický svým úzkým zaměřením na procesy a parametry vedoucí ke svahovým pohybům. Díky tomu je zřejmě nejlepším přístupem, který generuje nejpřesnější výsledky. Řada autorů (Barredo et al. 2000; Lineback, Gritzner et al. 2001; Dai et al. 2002) zároveň poukazuje na obrovské nároky na data, které často vedou k nadměrnému zjednodušování a to především v oblastech, kde podrobná data nejsou dostupná. Tato metoda se proto hodí spíše do průmyslových oblastí, které jsou podrobně zmapované v odpovídajícím měřítku.

Summary of the feasibility and usefulness of applying remote techniques for landslide hazard zonation in three working scales (after: Mantovani et al., 1996)

Type of landslide hazard analysis	Main characteristics	Regional scale	Medium scale	Large scale
Distribution analysis (landslide inventory approach)	Direct mapping of mass movement features resulting in a map that gives information only for those sites where landslides have occurred in the past.	2–3	3–3	3–3
Qualitative analysis (heuristic approach)	Direct or semi-direct methods in which the geomorphologic map is reclassified to a hazard map, or in which several maps are combined into one using subjective decision rules based expert-knowledge.	3–3	3–2	3–1
Statistical approach (stochastic approach)	Indirect methods in which statistical analysis are used to obtain predictions of mass movement from a number of parameter maps.	1–1	3–3	3–2
Deterministic approach (process-based)	Indirect methods in which parameter are combined in slope stability calculations.	1–1	1–2	2–3
Landslide frequency analysis	Indirect methods in which earthquakes and/or rainfall records or hydrological models are used for correlation with known landslide dates to obtain threshold values with a certain frequency.	2–2	3–3	3–2

The first number indicates the feasibility of obtaining the information using remote sensing techniques (1=low: it would take too much time and money to gather sufficient information in relation to the expected output; 2=moderate: a considerable investment would be needed, which only moderately justifies the output; 3=good: the necessary input data can be gathered with a reasonable investment related to the expected output). The second number indicates the usefulness (1=of no use: the method does not result in very useful maps at the particular scale; 2=of limited use: other techniques would be better; 3=useful).

Obrázek 18: Přehled jednotlivých přístupů k hodnocení náchylnosti, převzato z Mantovani et al. 1996

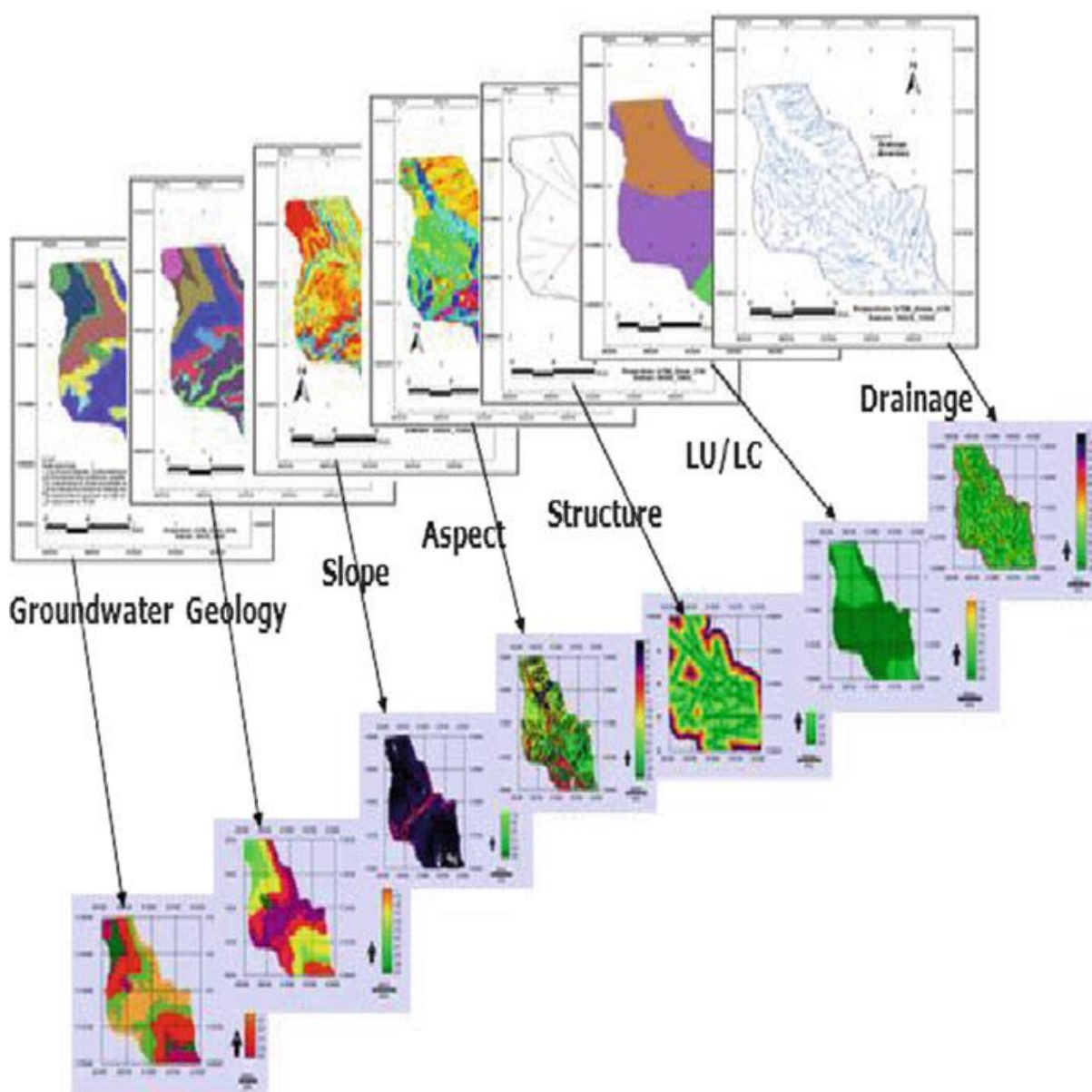
4.1 Modely náchylnosti v Etiopské vysočině

Jak je popsáno výše, k modelům náchylnosti lze přistupovat různě s ohledem na kvalitu vstupních dat, účel výstupu nebo velikost oblasti.

Ayele et al. 2014 ve své práci z lokality Dejen-Gohatsion, vymapovali 44 svahových deformací, které jsou jedním ze vstupujících faktorů pro vymezení pěti zón dle ohrožení před hazardy. K jejich určení používá metodu WLC (Weighted Linear Combination). Jedná se o statistickou metodu. Každá vrstva

vstupujících faktorů je reklasifikací převedena na rastrovou vrstvu se stejným rozsahem (0-255) ty potom kombinuje. V tomto případě je vstupujících parametrů sedm:

1. Hydrogeologické podmínky
2. Geologické podloží
3. Sklonitost svahu
4. Orientace svahu
5. Geologická struktura
6. Land Use/Land Cover
7. Odtokové poměry



Obrázek 19: Přehled reklasifikovaných vrstev, do jednotného rozpětí (Ayele et al. 2014).

Pro každý parametr je stanoven jeho vliv na výskyt svahových pohybů, ten je určen z výskytu svahových pohybů v této třídě. Zároveň operují se základními předpoklady, které podmiňují výskyt svahových pohybů. Například: S narůstající sklonitostí narůstá výskyt deformací, s narůstající vzdáleností od vodních toků jejich počet ubývá,... Výsledkem reklasifikace je 7 rastrů pro faktorů, které jsou rozděleny do tříd podle předpokladu a výskytu deformací. Vysoké hodnoty až po 255 odpovídají nejvyššímu výskytu, naopak nejnižší nízkému až nulovému. Po reklasifikaci je každému vstupujícímu faktoru přiřazena váha na základě znalosti oblasti a jejich párové analýzy. Tím je určeno, jak významně se každý faktor podílí na výskytu svahových pohybů. Největší význam autoři přidělují geologickému podloží a hydrogeologickým podmínkám, viz. Tabulka.

Factors	Weight
Geology	0.2414
Groundwater	0.2414
Drainage	0.1724
Slope	0.1724
Structure	0.1034
LULC	0.0345
Aspect	0.0345

Tabulka 2: Přehled vah jednotlivých faktorů dle Ayele et al. 2014.

Po tomto určení důležitosti faktorů je pak provedeno vážené přerytí – lineární kombinace, kdy je pro každou buňku výsledného rastru spočítána konečná hodnota (skóre) na základě hodnot ze vstupujících map. Výpočet je proveden na základě následujícího vzorce.

$$LHZ = v1X1 + v2X2 + v3X3 + v4X4 + v5X5 + v6X6 + v7X7$$

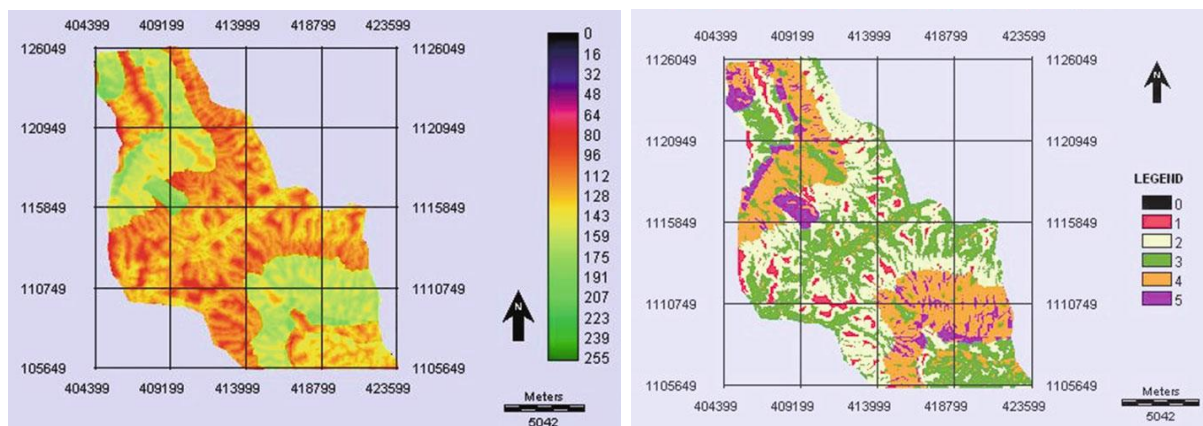
LHZ... Landslide Hazard Zonation

v1...v7 váhy každého faktoru

X1...X7 hodnoty vstupujících faktorů

Tím je vytvořen neklasifikovaný rastr náchylnosti, čím vyšší hodnoty, tím vyšší náchylnost (Obr vlevo).

Tento rastr pak byl pouze reklasifikován do 5-ti tříd, vyšší třída vyšší náchylnost (Obr vpravo).



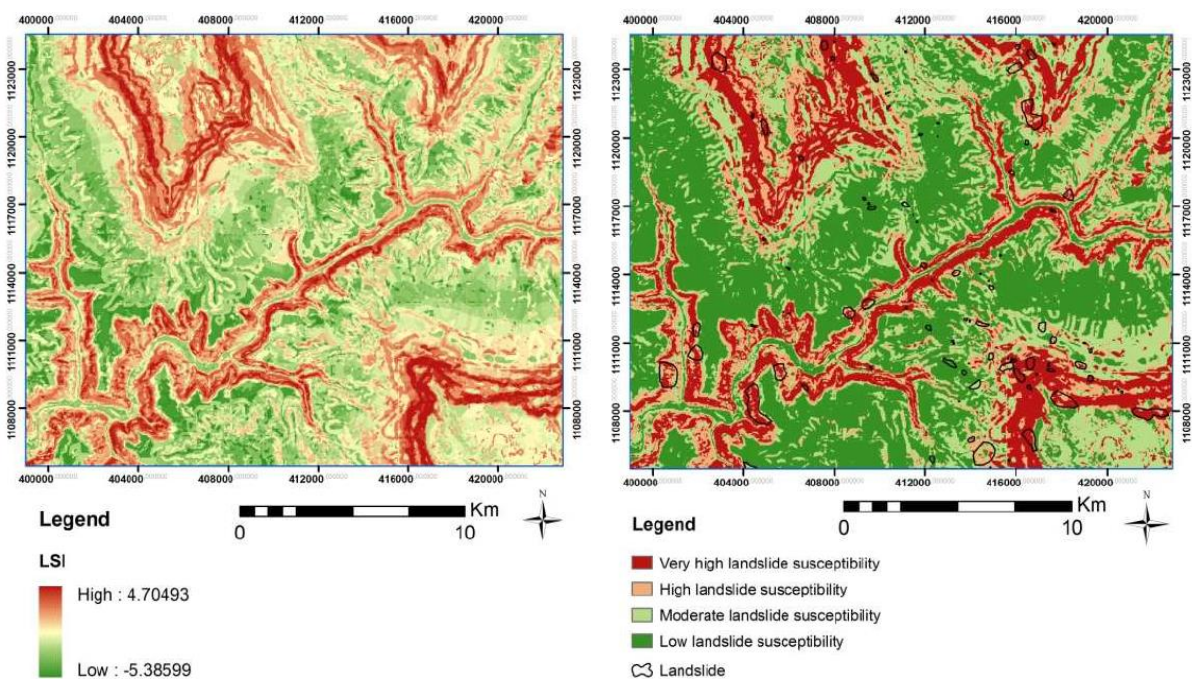
Obrázek 20: Výsledek lineární kombinace před reklasifikací, vpravo pak reklasifikovaná finální mapa náchylnosti (převzato z Ayele et al. 2014).

Dalším autorem zabývajícím se touto problematikou v oblasti Etiopské vysočiny je Asfaw (2010) z university v Gentu ve své diplomové práci. Opět se jedná o lokalitu Dejen-Gohatsion, nicméně autor používá jinou metodiku. Opět se jedná o metodiku za použití převážně nástrojů DPZ. Autor do metodiky zahrnul následující faktory:

1. Nadmořská výška
2. Sklonitost
3. Orientace svahu
4. Litologie
5. Land cover
6. Vzdálenost k vodnímu toku
7. Vzdálenost k cestě

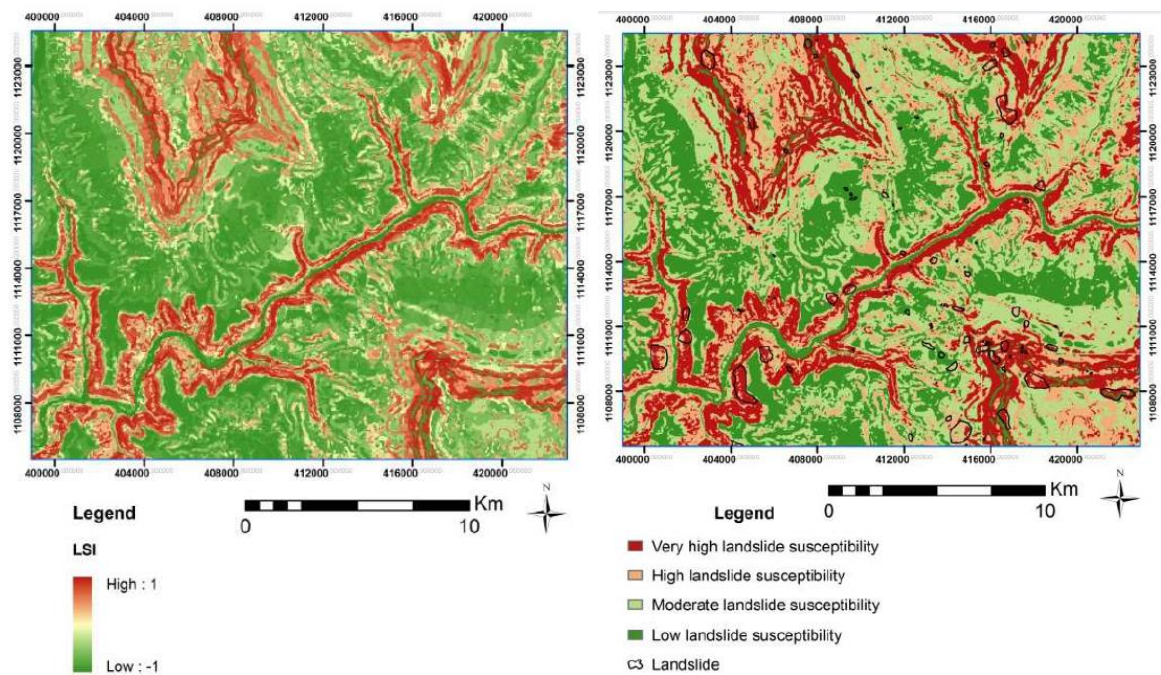
Autor během zpracovávání vyřadil faktor orientace svahu, jelikož nebyla prokázána žádná závislost mezi orientací svahu a výskytem svahových pohybů v této oblasti, což potvrzují Ayalew, Yamagishi (2004). Celkem ve svém zájmovém území (9km²) autor vymapoval 98 svahových pohybů. Pro určení náchylnosti byly použity 2 metody, v obou je použit výpočet LSI (Landslide Susceptibility Index), pro každý pixel vstupních rastrových vrstev. V souvislosti s tím poukazuje na to, že v případě této metodiky je často opomíjeno, že právě výskyt svahových pohybů ovlivňuje ostatní faktory, například velký sesuv výrazně změní například Land cover. Z tohoto důvodu nejsou použity primární vrstvy, ale autor v oblastech výskytu svahových deformací provádí rekonstrukce.

První metodou je metodika statistického indexu byla prezentována Van Westenem (1997b), v podstatě se jedná o způsob určení váhy každé třídy, každého parametru, kdy tato váha je určena jako logaritmus podílu hustoty svahových deformací v této třídě a hustoty svahových deformací v celém území. Tímto vzorcem a následným váženým překryvem rastrových vrstev byla získána rastrová vrstva s hodnotami LSI. Poté autor provedl reklasifikaci tohoto rastru do tříd. Soeters, Van Westen (1996) uvádí, že tento bod bývá často problematický a způsobu klasifikace tříd je několik. Autor přejímá metodiku Galanga (2004), která je v podstatě manuálním rozdělením do tříd tak, že v třídě s nejvyšší náchylností je 2x více svahových deformací než v následující třídě a tak dále. Autor takto vymezuje 4 třídy.



Obrázek 21: Neklasifikovaný a klasifikovaný výstup metody Statistického indexu dle Van Westena (převzato z Asfaw 2010)

Druhou metodou je metodika dle Shortliffe, Buchanan (1975) zvaná Certainty factor. Tato metoda byla původně vyvinuta pro medicínské využití, nicméně našla bohaté uplatnění i ve výzkumu svahových pohybů. Metoda opět pracuje s hustotou svahových deformací v dané třídě a v celé oblasti. Na jejich základě pak určuje jistotu výskytu v dané třídě. Hodnoty nabývají hodnot od -1 do 1, -1 znamená nepravdu, 1 pravdu. Obecně řečeno čím vyšší pozitivní hodnoty tím větší vliv faktoru na výskyt a naopak. Hodnoty blízké 0, značí neprokazatelnou kauzalitu. S výsledky jistot výskytu pro jednotlivé třídy je prováděna párová analýza. Na základě těchto výsledků je opět proveden vážený překryv a určeny hodnot LSI pro každý pixel.

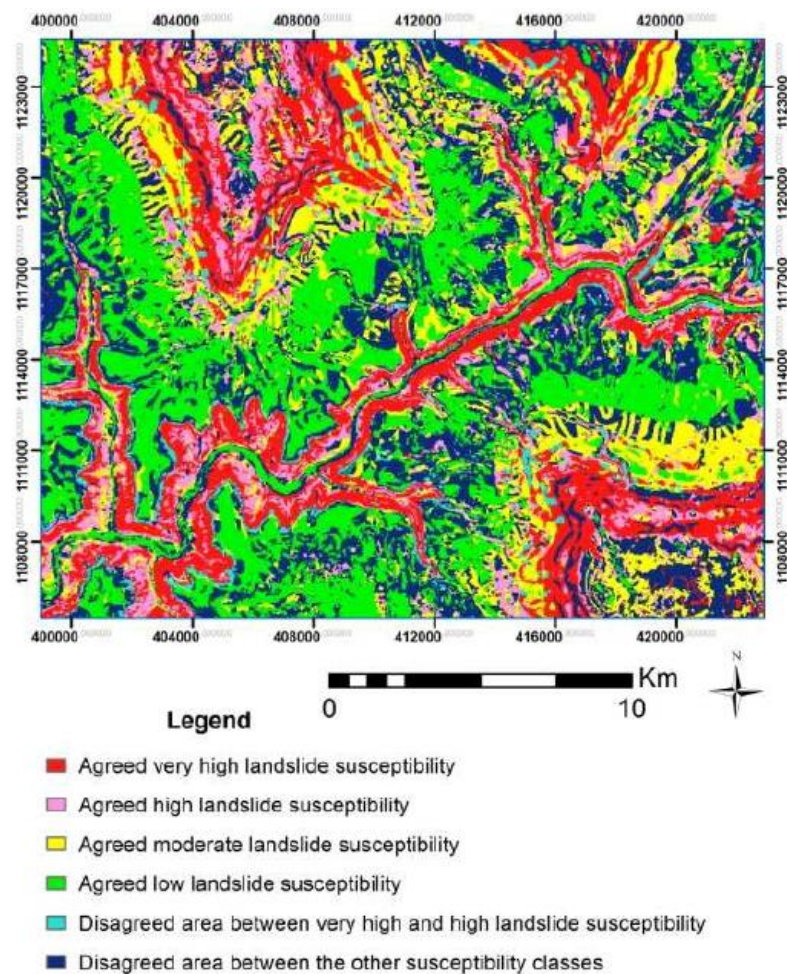


Obrázek 22: Neklasifikovaný a klasifikovaný výstup metody Certainty factor dle Shortliffe, Buchanan (převzato z Asfaw 2010)

Jak je vidět z následujícího obrázku metody generují podobné výsledky a obě dvě jsou dle autora vhodné. Autor to dokládá srovnáním metod na základě tří parametrů:

- Korelační koeficient mezi mapami náchylnosti získanými jednotlivými metodami
- Procento souhlasně klasifikované oblasti oběma metodami
- Procento pozorovaných svahových pohybů v těchto souhlasných oblastech

Autor nakonec porovnává výsledné mapy s vymapovanými svahovými pohyby a na základě lepších predikcí svahových pohybů určuje metodu Statistical Index za lepší (viz Obr níže).



Obrázek 23: Srovnání výsledků metody Statistical Index a Certainty Factor (převzato z Asfaw 2010)

V lokalitě Dessie prováděli mapování náchylnosti autoři Ayenew, Bariberi (2005). Jejich práce byly převážně terénního charakteru. Autoři neprováděli komplikované analýzy v GIS prostředí, ale náchylnost určovali na základě podrobných map ovlivňujících faktorů. Těmito faktory v jejich případě byly:

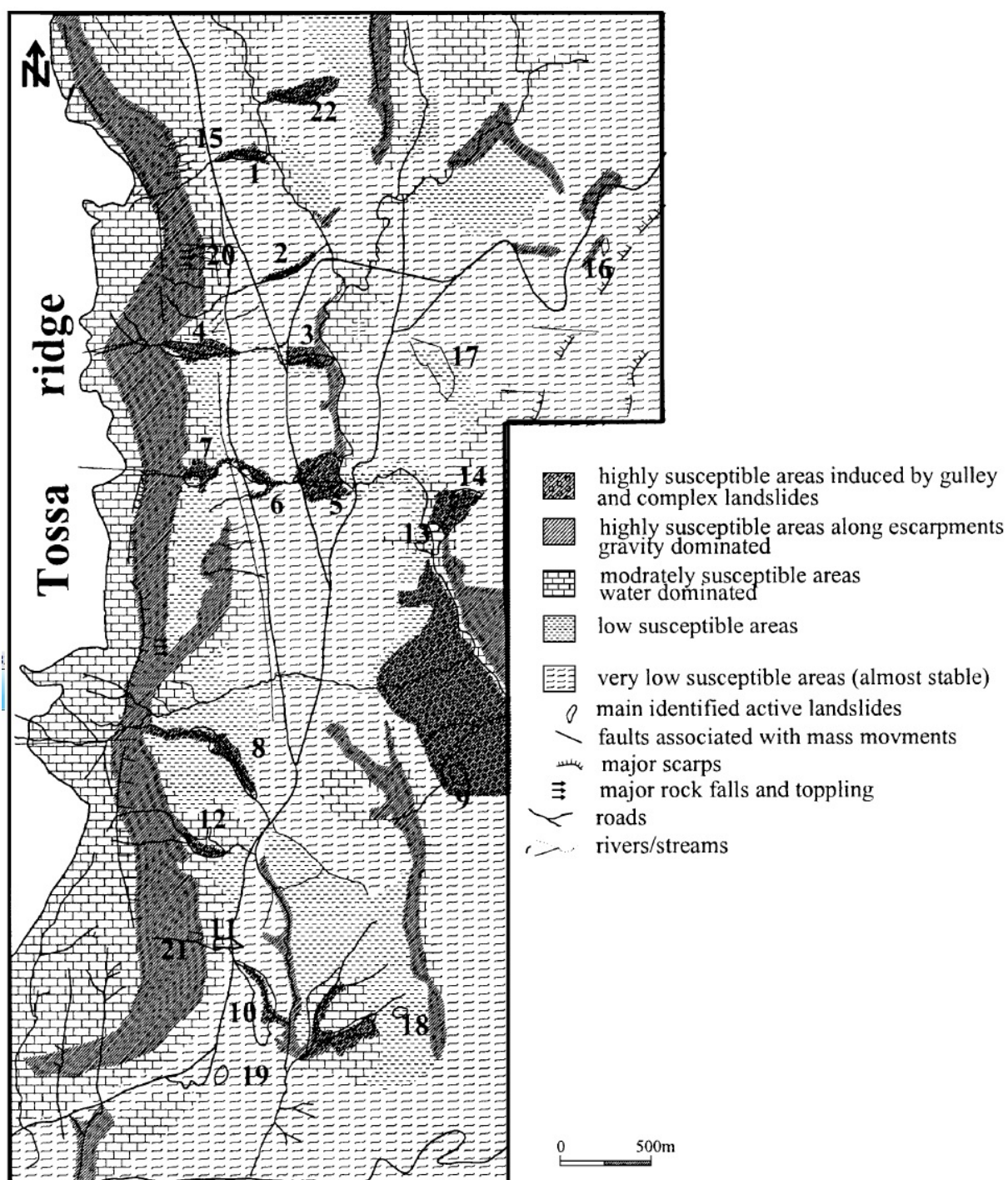
1. Geologická skladba
2. Hydrologické poměry
3. Geotechnologické vlastnosti půdy a hornin
4. Sklonitost
5. Land use

Autoři zkombinovali výstupy z terénu s výsledky z laboratoří (geotechnologické vlastnosti). Nejdříve si celé území (15km²) rozdělili na menší mapované jednotky, pro které zvažovali jednotlivé vstupní faktory. Výstupy z laboratoře a terénu poté zanesli do vrstev, které přes sebe překryli. Dále autoři také uvádí seznam dalších činitelů, které při mapování náchylnosti zvažovali:

- Trhliny v půdách

- Čerstvá skalní řícení
- Inženýrské sítě
- Sklonitost svahů
- Litologické a geomorfologické podmínky
- Geotechnologické vlastnosti půd a hornin
- Vodní režim půd během období dešťů
- Vzdálenost od aktivních svahových pohybů
- Landuse
- Přítomnost stabilizačních opatření
- Další antropogenní faktory jako například těžba či deforestrace

Bohužel autoři neuvádí žádný detailnější popis metodiky. Úplně chybějí fakta o velikosti mapovaných jednotek, vahách jednotlivých faktorů při překrytí, nebo jak zahrnuli výše uvedené činitele do výsledné mapy.



Obrázek 24: Mapa náchylnosti z oblasti Dessie (převzato z Ayenew, Bariberi 2005)

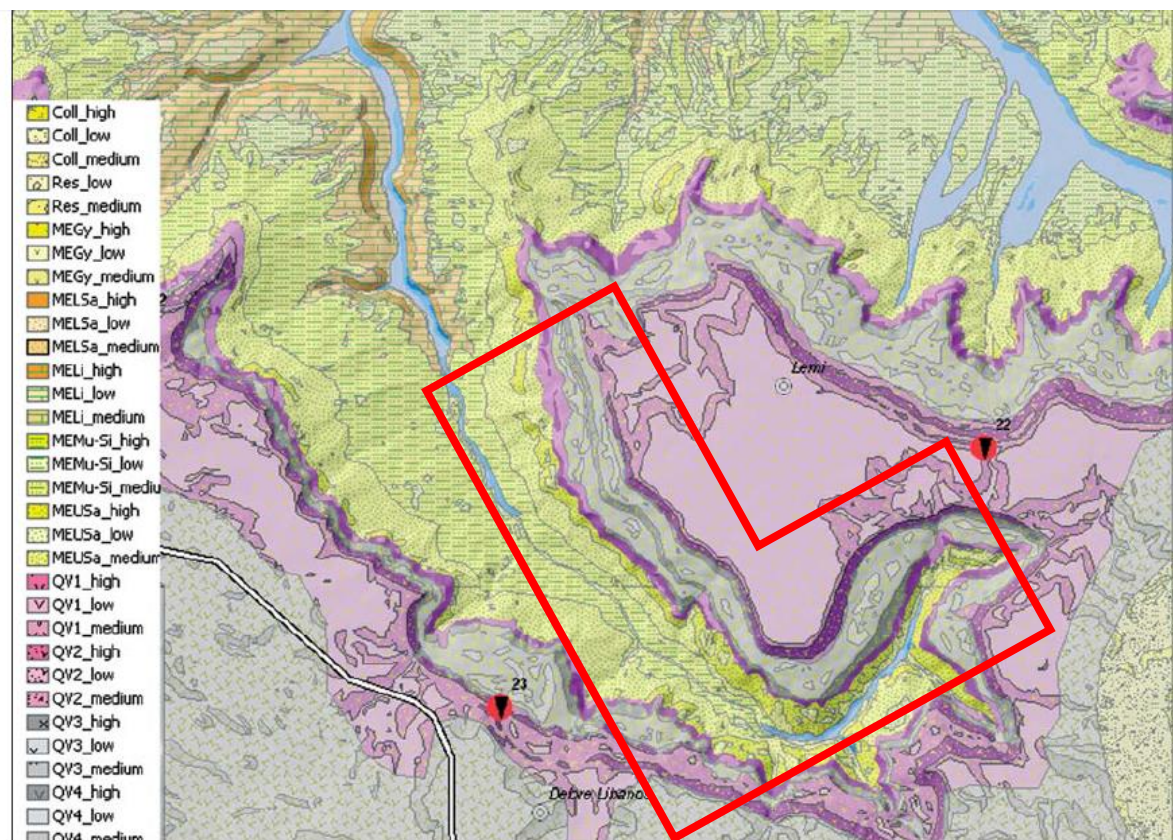
Další lokalitou kde byla prováděno mapování náchylnosti je povodí řeky Jemmy. Toto mapování probíhalo v rámci již zmiňovaného mezinárodního projektu. Od roku 2006 zde probíhal komplexní výzkum zaměřený na management vodních zdrojů. V rámci tohoto projektu byly provedeny také základní mapovací práce a vznikly tak např. podrobné geologické mapy, hydrologické mapy, mapy landuse. Zde je nutno poznamenat, že se v jednalo o opravdu rozsáhlý projekt, který poskytl Etiopské vládě do té doby chybějící základní mapové podklady. Například do té doby nepodrobnější geologická

mapa je v měřítku 1 : 2 000 000 z roku 1975 (Kazmin 1975). V rámci tohoto projektu probíhaly také vzdělávací aktivity a výměna znalostí s místními obyvateli, tak aby byla zajištěna návaznost a udržitelnost projektu. Výstupem projektu byla také mapa náchylnosti k rizikovým procesům (Šíma et al. 2009). Tato mapa náchylnosti vznikla jako nadstavba inženýrsko geologické mapy oblasti. 28 geologických jednotek bylo rozděleno do tří kategorií energie reliéfu, z čehož vzniklo 84 tříd. Ke každé této jednotce byly přiděleny informace odolnosti hornin, geomechanické vlastnosti půd. Z důvodu nedostatku terénních dat byla pro rozdělení do tříd náchylnosti použita jednoduchá skórovací tabulka ohrožení (viz níže).

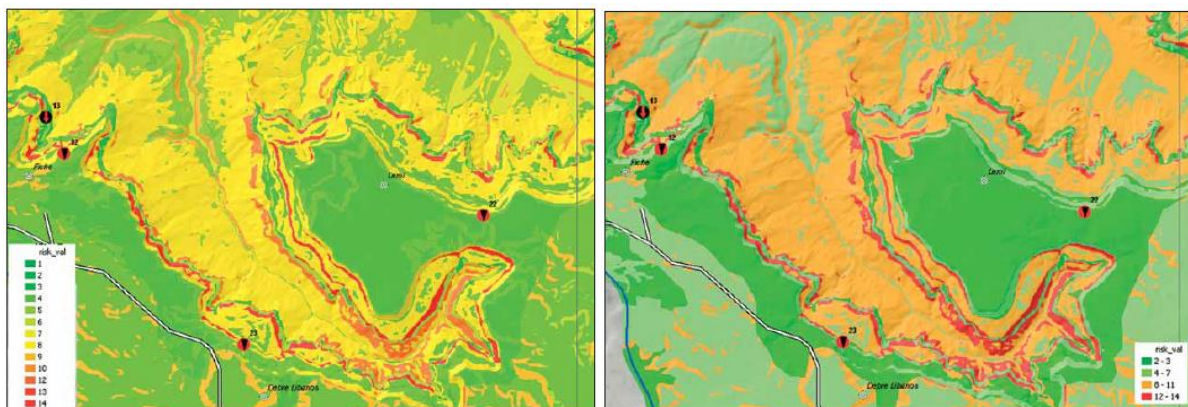
Risk	Low	Medium	High
Relief energy	1	2	3
Rock strength	1	2	3
Landslide risk	1	2	3
Rockfall/slide risk	1	2	3
Erosion	1	2	3
Piping	1	2	3
Floods; side erosion	1	2	3
Ground swelling	1	2	3

Tabulka 3: Skórovací tabulka pro jednotlivá ohrožení a energii reliéfu

V rámci tohoto projektu nebyly prováděny detailní mapovací práce svahových deformací, jak je vidět z následujícího obrázku, v celé mnou zkoumané lokalitě nebyl lokalizován žádný svahový pohyb.



Obrázek 25: Příklad inženýrskogeologické mapy lokality Portugalský most (převzato z Šíma et al. 2009). Mnou zkoumaná lokalita je přibližně označena červeně.

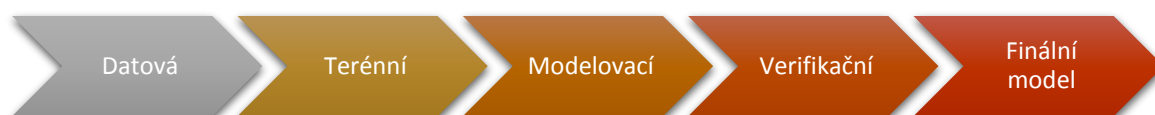


Obrázek 26: Ukázka map náchylnosti z lokality Portugalský most, rozdělení na 14 a 4 zóny (převzato z Šíma et al. 2009)

Jak již bylo řečeno, primárním cílem tohoto projektu nebylo mapování náchylnosti. Jedná se v podstatě o sekundární produkt. Nicméně výsledky tohoto projektu nabízejí výborný datový základ pro detailnější zkoumání této oblasti.

5. Metodika práce

Cílem této práce je vytvoření metody pro zjišťování náchylnosti ke svahovým pohybům pomocí dat dálkového průzkumu země. Byl zvolen podobný přístup jako např. Ayele et al. (2014). V první fázi byly shromážděny a upraveny mapové podklady pro danou oblast a vymapovány svahové pohyby. Ve druhé fázi byla prováděna terénní verifikace těchto pohybů a doplnění prvotní mapy o tyto poznatky. Ve třetí fázi byl vytvořen model náchylnosti. Dále byl tento model porovnán s náhodným výběrem deformací vymapovaných v první fázi. Tím byl vytvořen finální model.



Obrázek 27: Proces metodiky

5.1 Fáze datová

Jednou z nejdůležitějších činností v této fázi bylo mapování svahových deformací v družicových snímcích. Hlavním zdrojem těchto podkladových dat byl Google Earth. Při mapování bylo využíváno především možnosti pohledu z různých úhlů. Další obrovskou výhodou je topografie dodaná do těchto snímků. Nejužitečnější funkcionalitou, kterou Google Earth nabízí je ale nesporně možnost prohlížet stejné území v různých časových řezech. Tato možnost je výhodná obzvláště pro výzkum svahových deformací. Petley et al. (2005), tvrdí, že porušení svahu svahovým pohybem zanechá morfologické znaky, díky nimž lze svahové pohyby identifikovat a klasifikovat metodami DPZ. Svahové deformace tedy během vzniku mění vzhled krajiny, ale zároveň se do ní rychle začleňují, a právě díky snímkům z více časových řezů je možné snáze identifikovat starší svahové deformace. Pokud je těchto časových řezů několik je možné je použít také pro datování. Na následujícím příkladu je vidět sesuv, který vznikl mezi léty 2005 a 2009. V roce 2005 je svah plně pokryt vegetací, kdežto v roce 2009 je zde jasně identifikovatelný sesuv. Nevýhodou snímků z Google Earth je jejich nekonstantní kvalita. To může vést až k nutnosti snížení měřítka mapovaných prvků.



Obrázek 28: Znázornění časových řezů v Google Earth a jejich využití pro výzkum svahových deformací. (Převzato ze Schreiberová 2004)

Dále v této fázi byly sesbírány další mapové podklady nutné pro tvorbu modelu. Jedná se o datové vrstvy pro GIS software: DMT, geologická mapa, mapa vodních toků, land cover

5.2 Fáze terénní

V této fázi probíhala verifikace vymapovaných svahových deformací v terénu. Lokalita je pro samotnou verifikaci relativně dobře dostupná. V tomto případě nebyla prováděna žádná měření na jednotlivých deformacích, pouze potvrzení jejich výskytu. Během této fáze byly některé svahové deformace z mapových podkladů odstraněny, protože se jejich přítomnost nedala ověřit a naopak některé nové byly do mapy zaneseny.

5.3 Fáze modelovací

Příprava a tvorba prvotního modelu probíhala povětšinou v GIS prostředí, konkrétně v programu ArcGis od firmy ESRI. Stěžejní byly především nástroje z extenze Spatial Analyst – Reclassify a Weighted Overlay. Nástroj Reclassify slouží pro reklasifikaci rastru do námi zvolených tříd. Tento nástroj byl nepostradatelný po převodu vektorových vrstev na rastry, kdy bylo třeba tyto rastry upravit tak, aby měli jednotné rozpětí a hodnoty jednotlivých tříd odpovídaly jejich vlivu. Nástroj Weighted Overlay – neboli vážený překryv byl použit po vytvoření těchto reklasifikovaných rastrů. Reklasifikované rastry

přes sebe byly překryty a pro každý pixel výsledného rastru byla spočítána vážená hodnota na základě reklasifikovaných rastrů a jejich významnosti.

Jakmile byly popsány nástroje použití v modelovací fázi, je třeba se zaměřit také na jejich vstupní data, tedy nereklasifikovaná data a proces stanovení vah jednotlivých tříd parametrů. Celkem bylo do modelu vybráno 6 vstupujících faktorů, které ovlivňují náchylnost ke svahovým pohybům.

1. Nadmořská výška (NM),
2. Sklonitost (SKL),
3. Litologie (GP),
4. Vzdálenost ke geologickému rozhraní (GS),
5. Land cover (LC),
6. Vzdálenost k vodnímu toku (VVT).

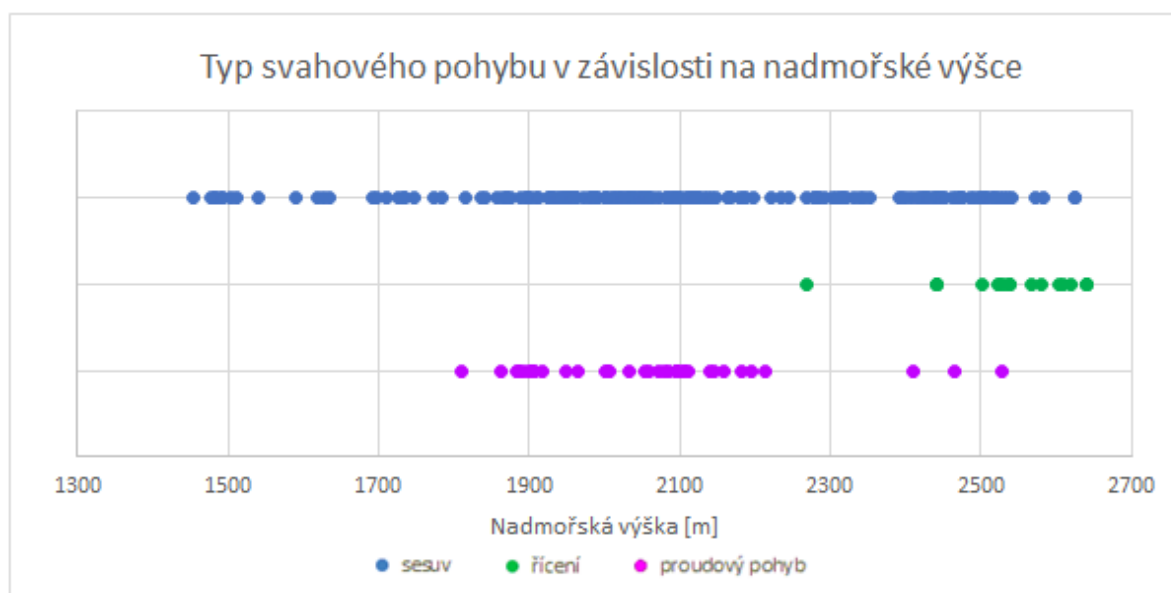
Popis, jak se jednotlivé faktory projevují na náchylnosti svahů, byly detailně popsány v úvodní části, proto je zde popíši jen ve stručnosti, tak jak byly aplikovány do modelu. Jejich skutečný vliv byl určen statisticky, postup určení významnosti a tvorby finální mapy je také popsán níže. Do analýz se často zahrnuje také vliv orientace svahu, která vlivem rozdílného oslunění ovlivňuje stabilitu svahu. Nicméně autorům Asfaw (2010) a Ayalew, Yamagishi (2004) ve svých pracech z Etiopské vysočiny nepodařilo prokázat vliv tohoto faktoru. Mnou zkoumaná oblast má rovnoběžkově protáhlý tvar s relativně jednoduchou terasovitou strukturou, což se projevuje na téměř jednotné orientaci všech svahů. S ohledem na tyto dvě fakta nebyla orientace svahu zahrnuta do modelu.

5.3.1 Nadmořská výška (NM)

Nadmořská výška je jedním z faktorů ovlivňujícím stabilitu svahu. Předpoklad je, že s rostoucí výškou roste intenzita exogenních procesů. Z hlediska modelu by lepším vstupem byla relativní nadmořská výška, od vodního toku. Jelikož zkoumané území je malého rozsahu a rozdíly v relativní nadmořské výšce na západním a východním okraji nejsou tak velké byla v modelu ponechána absolutní výška. Druhým faktorem velká pracnost přípravy takové vrstvy.

V následujícím grafu je znázorněno rozložení svahových pohybů dle nadmořské výšky a typu. Jednoznačně lze vidět, že říční jsou situována do vyšších nadmořských výšek kolem 2500 m. To je způsobeno především terasovitým uspořádáním údolí (viz Obr). Tyto terasy jsou tvořeny lávovými proudy. Co se týče sesuvů, jejich distribuce je rovnoměrná napříč nadmořskými výškami. Pásmo výskytu sesuvů zachycuje celé údolí, od koryta řeky (1400m) až po horní hranu (2650). Proudové

pohyby jsou také rozděleny rovnoměrně, s mírně vyšší distribucí v nižších nadmořských výškách (kolem 2000 m), nicméně pásmo jejich výskytu není zdaleka tak široké jako v případě sesuvů. Kromě 3 proudových pohybů v blízkosti horní hrany se všechny nacházejí ve výškách mezi 1800 a 2300 m.

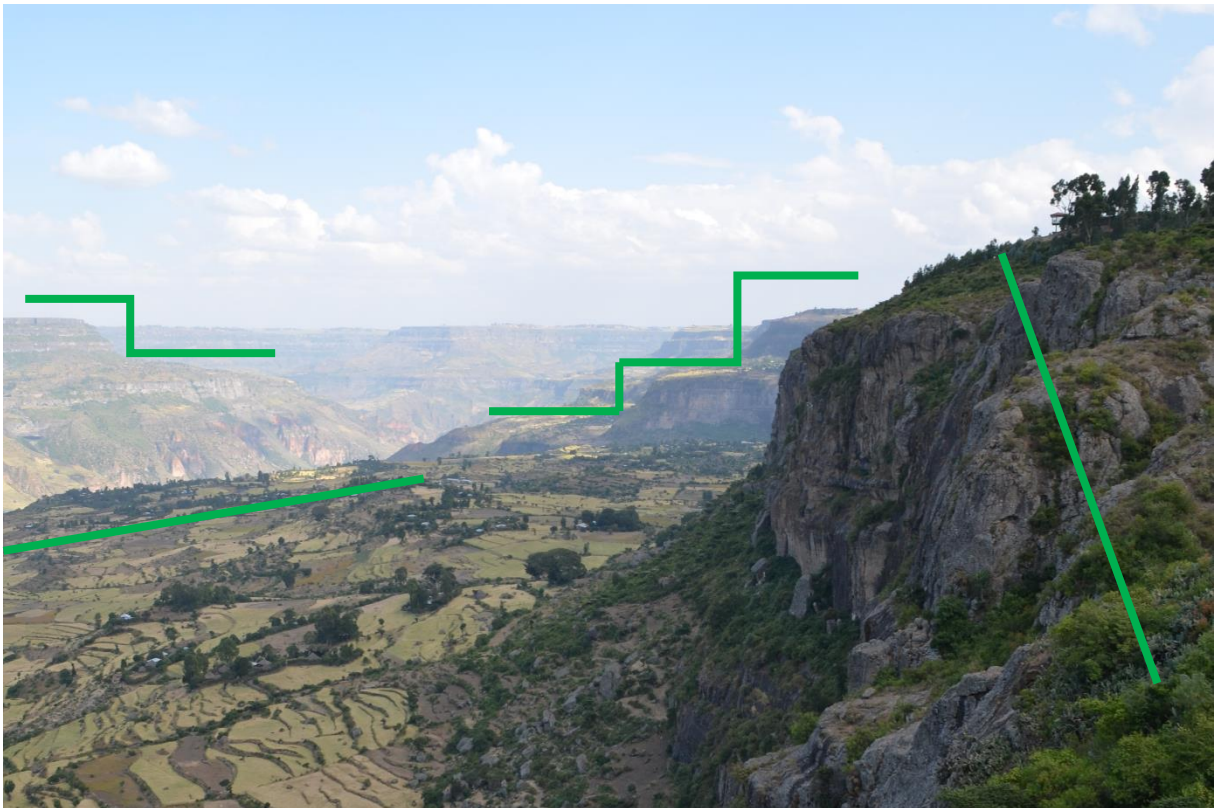


Graf 2: Typ svahového pohybu v závislosti na nadmořské výšce

Následující tabulka ukazuje koncentraci pohybů a jejich variabilitu. Opět se potvrzuje výskyt řícení ve výškách kolem 2500m. Sesuvy mají průměrnou výšku výskytu 2100 m a proudové pohyby o něco níže. Zde nevypadá, že by proudové pohyby byly lokalizovány výrazně níže, ale tabulka obsahuje všechny pohyby, včetně 3 výše umístěných proudových pohybů, které průměr posouvají do vyšších hodnot. Také směrodatná odchylka jasně potvrzuje rozložení z grafu, řícení mají nejnížší variabilitu, následně proudové pohyby (opět ovlivněno 3 výše položenými) a nejvyšší variabilitu mají sesuvy.

Nadmořská výška	Maximum	Minimum	Průměr	Medián	Směrodatná odchylka
Sesuv	2633	1452	2107	2083	275
Říčení	2642	2268	2536	2538	92
Proudový pohyb	2529	1810	2062	2065	162

Tabulka 4: Základní statistické ukazatele pro závislost svahových pohybů na nadmořské výšce

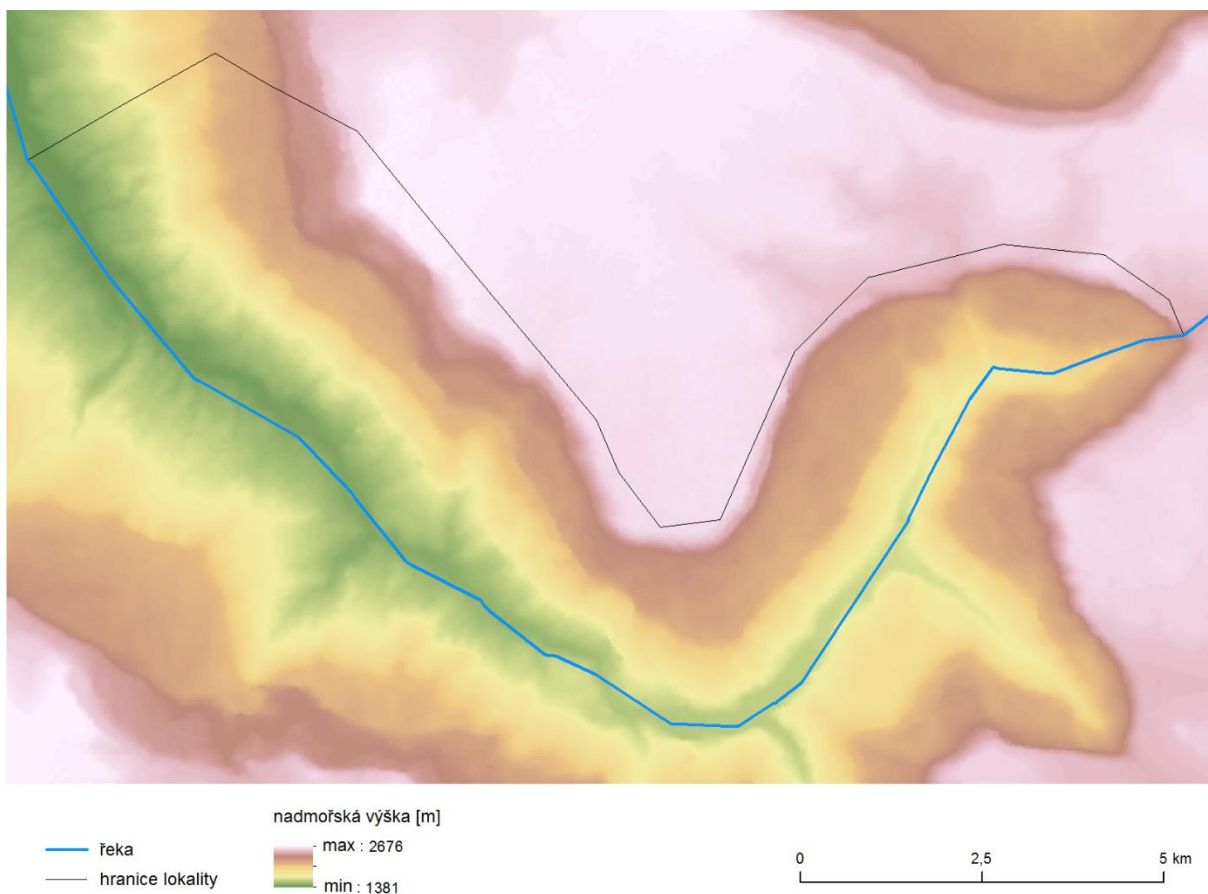


Obrázek 29: Pohled do údolí, s jasně znatelnými úrovněmi strukturních teras



Obrázek 30: Vizualizace říčení z Google Earth na rozrušené hraně vrchní strukturní terasy, jasně identifikovatelné jsou oddělené velké horninové bloky

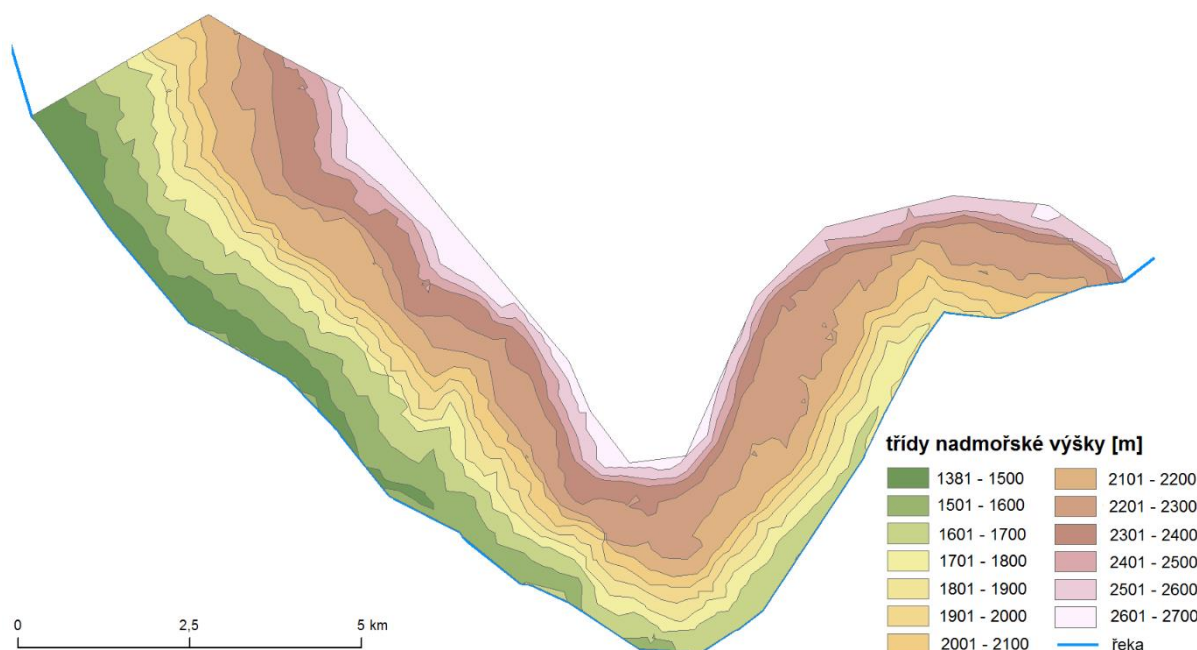
Jak je vidět z následujících map, nadmořská výška roste se vzdáleností od řeky, k výraznějším změnám dochází především na terasovitých stupních.



Obrázek 31: Topografická mapa širší oblasti

Třída	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Nadmořská výška (hraniční)	1500	1600	1700	1800	1900	2000	2100	2200	2300	2400	2500	2600	2700
Zastoupení	5%	8%	10%	7%	6%	6%	6%	13%	15%	9%	4%	5%	4%

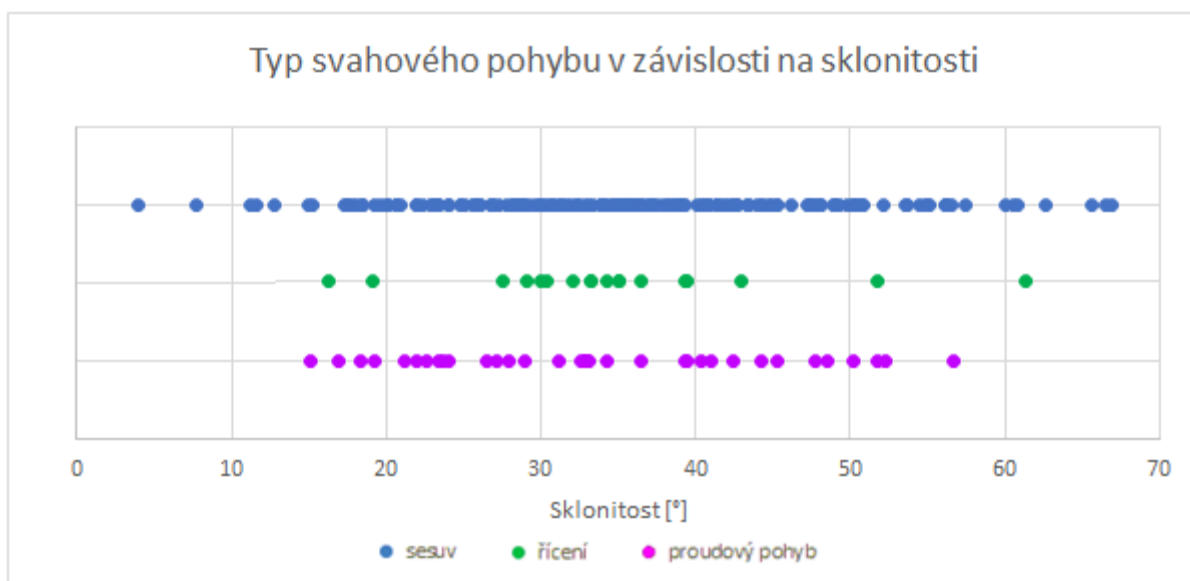
Tabulka 5: Zastoupení jednotlivých tříd a klíč pro reklasifikaci



Obrázek 32: Reklasifikovaná topografická mapa

5.3.2 Sklonitost (SKL)

Sklonitost je dalším významným faktorem ovlivňujícím stabilitu svahu a tedy náchylnost ke svahovým pohybům. Předpokládá se, že s rostoucím sklonem roste náchylnost k pohybu. Na začátek bych chtěl upozornit, že maximální sklonitost v oblasti je dle digitálního modelu terénu 75° , i když z fotografií výše je jasně zřetelné, že v oblasti jsou sklony vyšší. Toto podhodnocení sklonu je způsobeno nízkým rozlišením vstupujícího digitálního modelu a způsobem výpočtu sklonitosti, což způsobuje zprůměrování sklonu těchto rozsahem malých srázů do výsledných buněk rastru. Následující graf zobrazuje distribuci svahových pohybů dle mechanismu pohybu a sklonitosti. Kromě jednoho říčení, se všechna odehrála na svahu se sklonem přes 20° . Rozdělení všech typů pohybu je v podstatě rovnoměrné. Opět nejširší rozpětí mají sesuvy, které se vyskytují i na mírných svazích se sklonem pod 20° . Sklonitost v dané lokalitě je velice proměnlivá a to díky terasovitému údolí. Sklon nemá rovnoměrný průběh, ale dochází k častým změnám v místech, kde jsou strukturní terasy a jejich stupně. To je patrné i přiloženého obrázku prezentující sklonitost v lokalitě, kde jsou jasně rozeznatelné stupně teras (tmavé čáry), pro názornost jsem je označil zelnými šipkami.

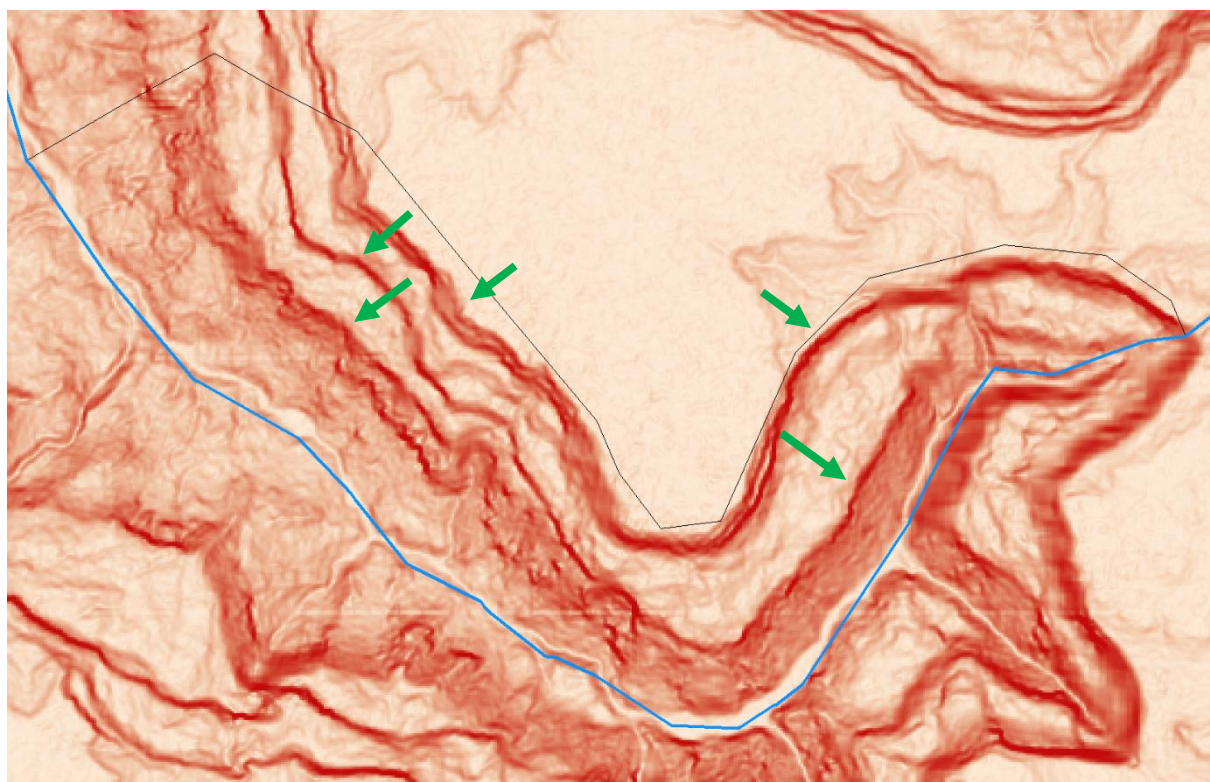


Graf 3: Typ svahového pohybu v závislosti na sklonitosti

Z následující tabulky je vidět, že průměrná výška všech pohybů je podobná kolem 35°, což je geomorfologická definiční hodnota pro označení svahu jako sráz, v pedologických metodikách je za sráz označován svah se sklonem přes 25° (Vyhláška 327/1998 Sb.).

Sklonitost	Maximum	Minimum	Průměr	Medián	Směrodatná odchylka
Sesuv	67	4	36	36	12
Říčení	61	16	35	34	10
Proudový pohyb	57	15	34	33	11

Tabulka 6: Základní statistické ukazatele pro závislost svahových pohybů na sklonitosti



sklonitost [°]

max : 73
min : 0

řeka

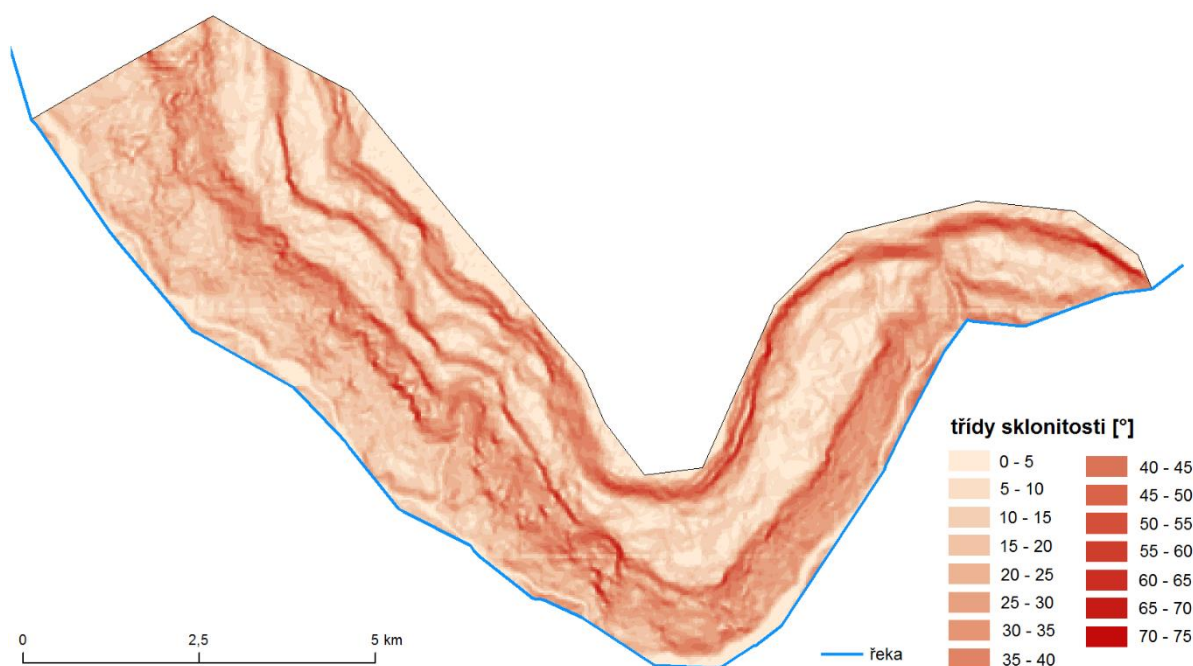
hranice lokality

0 2,5 5 km

Obrázek 33: Vizualizace sklonitosti širší oblasti, čím tmavší barva tím vyšší sklon, zeleně jsou označeny místa terasových stupňů. V mapě jsou zřetelně rozeznatelné terasovité stupně, což jsou oblasti s vysokou sklonitostí.

Třída	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Sklonitost (hraniční) [°]	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75
Zastoupení	10%	14%	15%	13%	12%	11%	9%	7%	4%	3%	2%	1%	0.3%	0.1%	0.02%

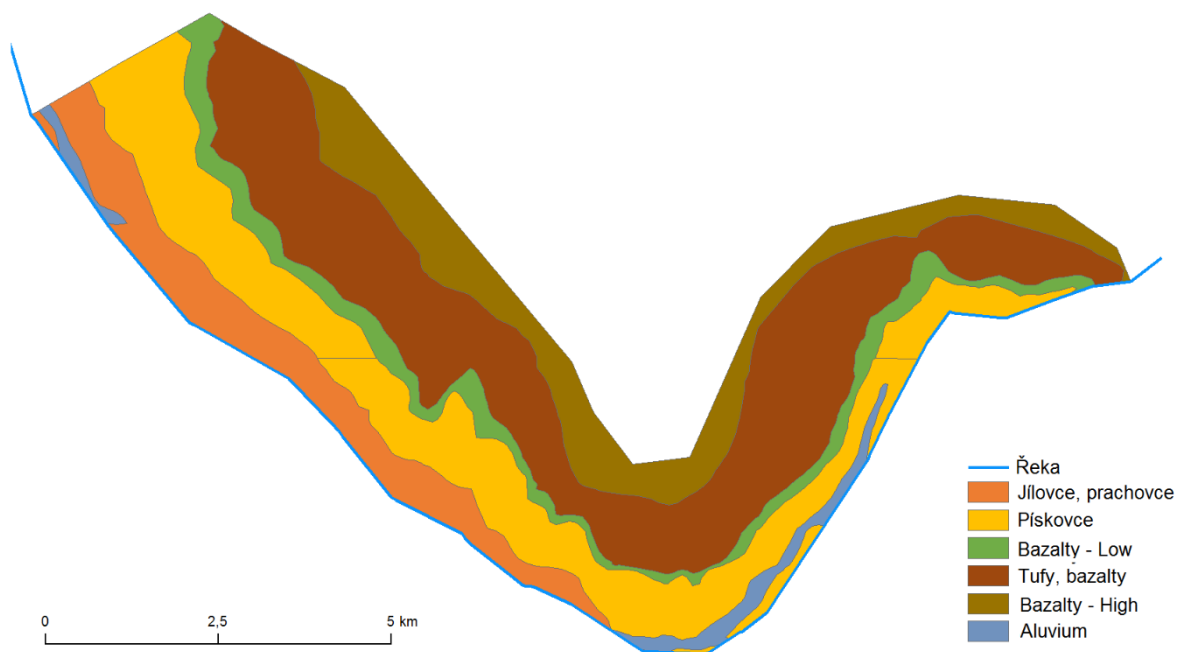
Tabulka 7: Zastoupení jednotlivých tříd a klíč pro reklasifikaci



Obrázek 34: Reklasifikovaná mapa sklonitosti zkoumané oblasti

5.3.3 Litologie (GP)

Co se geologie týká, jednotlivé oblasti jsou uspořádány téměř rovnoběžně s řekou, nejbližší jsou jílovce a prachovce, aluvium, následované vrstvami druhohorních pískovců, na kterých leží vrstvy bazaltů oddělené od sebe vrstvou tufových uloženin. Plošné rozložení je viditelné na následující mapě a procentuální zastoupení pak v tabulce níže. Nejvyšší výskyt svahových pohybů je na bazaltech a tufech, naopak nejmenší je na prachovcích a jílovcích, na aluviu se nevyskytl ani jeden.



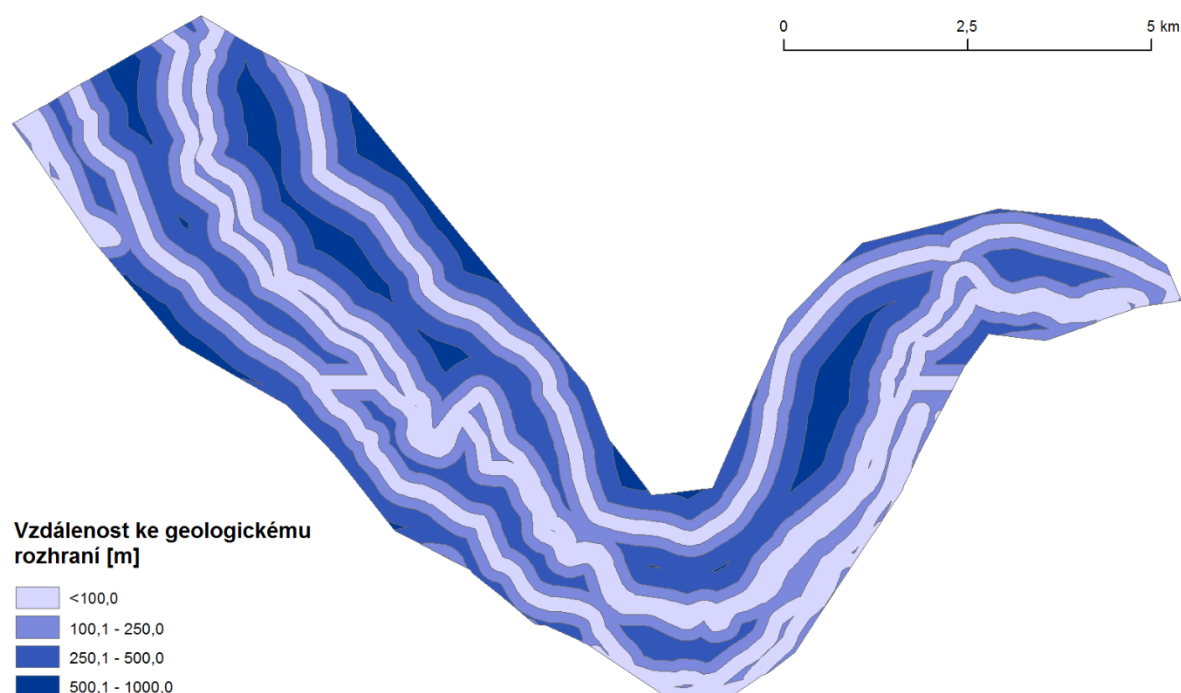
Obrázek 35: Geologická mapa oblasti

Třída	ID třídy	Relativní zastoupení třídy v oblasti
Aluvium	1	3%
Jílovce, prachovce	2	11%
Pískovce	3	26%
Bazalty - Nižší	4	8%
Tufy, bazalty	5	37%
Bazalty - Vyšší	6	15%

Tabulka 8: Zastoupení jednotlivých tříd a klíč pro reklasifikaci, označení vyšší a nižší odpovídá poloze

5.3.4 Vzdálenost ke geologickému rozhraní (GS)

Základním předpokladem u tohoto faktoru je, že čím blíže ke geologickému rozhraní tím vyšší by měl být výskyt svahových pohybů. Tento fakt se potvrdil, více než polovina všech pohybů leží v pásmu prvních 100 metrů od geologického rozhraní. S rostoucí vzdáleností jejich počet rovnoměrně klesá, přibližně s každou třídou na polovinu.



Obrázek 36: Mapa vzdálenosti od geologického rozhraní

Hraniční vzdálenost [m]	ID třídy	Relativní zastoupení třídy v oblasti
100	1	32%
250	2	32%
500	3	29%
1000	4	7%

Tabulka 9: Zastoupení jednotlivých tříd a klíč pro reklasifikaci

5.3.5 Land Cover/LandUse (LC)

Některé krajinné pokryvy jsou obecně náchylnější k výskytu svahových pohybů. Vliv vegetace je často zmiňován jako výrazný stabilizační prvek svahu. Nejvíce pohybů se vyskytuje na nejvíce zastoupené třídě – mozaika orné půdy s vegetací, V porovnání relativních zastoupení nemá žádná třída krajinného pokryvu významně vyšší výskyt svahových pohybů. S ohledem na nízkou variabilitu krajinného pokryvu a podobnost jednotlivých tříd bylo možno použít i mapový podklad s horším rozlišením.



Obrázek 37: Mapa Land Coveru

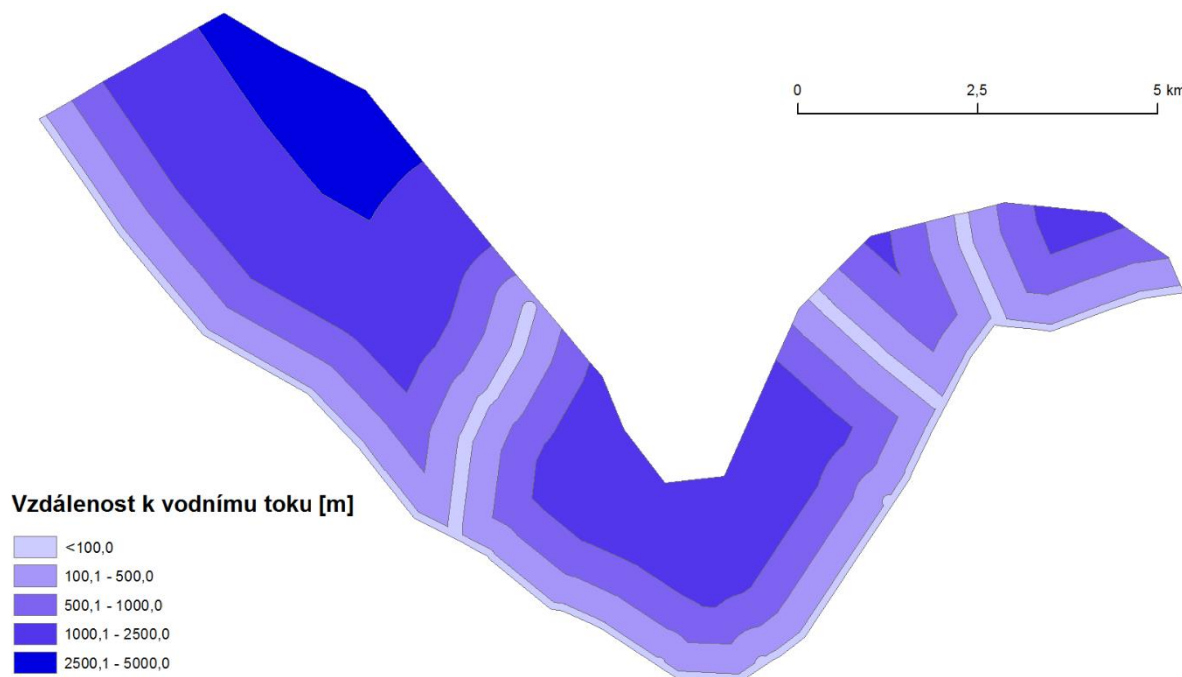
Název třídy	ID třídy	Relativní zastoupení třídy v oblasti
Mozaika orné půdy a vegetace	1	52%
Mozaika vegetace a orné půdy	2	9%
Půda bez vegetačního pokryvu	3	0%
Orná půda	4	5%
Mozaika lesů, křoviny a trav	5	10%
Křoviny	6	24%

Tabulka 10: Zastoupení jednotlivých tříd a klíč pro reklasifikaci

5.3.6 Vzdálenost k vodnímu toku (VVT)

Čím blíže je svah k vodnímu toku, tím více je vystaven erozním účinkům proudící vody. S narůstající vzdáleností od řeky tak bude klesat pravděpodobnost svahového pohybu. Jelikož ale svahové pohyby byly mapovány jako bodové značky umísťované do oblasti odlučné oblasti, nebude maximální výskyt v oblastech těsně vedle toku. Tento fakt je navíc umocněn tím, že vodní tok má formu liniového prvku a nikoli polygonu. Tato linie představuje proudnici toku, samotná šířka vodního koryta je během období dešťů několik desítek metrů široká (viz obr níže). Tedy prvních několik desítek metrů od této linie představuje v podstatě oblast plochého vodního koryta. Z výše uvedeného plyne, že očekávaná

relativní maxima budou ve druhém vzdálenostním pásu, což se také potvrdilo. Minima výskytu jsou naopak v třídách nejbližší a nejdále od vodního toku.



Obrázek 38: Vzdálenost k vodnímu toku

Hraniční vzdálenost k vodnímu toku [m]	ID třídy	Relativní zastoupení třídy v oblasti
100	1	7%
500	2	26%
1000	3	25%
2500	4	35%
5000	5	7%

Tabulka 11: Zastoupení jednotlivých tříd a klíč pro reklasifikaci



Obrázek 39: Vizualizace koryta v povodí Jemmy z lokality Portugalský most, koryto je zde téměř 400 m široké

5.3.7 Významnost tříd parametrů

Zásadní při tvorbě modelu je určení významnosti vah jednotlivých tříd parametrů. Pro potřeby práce byl použit princip metodiky statistického indexu. Tato metodika byla nově vytvořena, je ale podobná metodice holanďana Van Westena (Van Westen 1997b), ze které částečně vychází. Původní metodika pracuje s polygonální vrstvou svahových pohybů, tedy porovnává plochu celé deformace se zastoupením jednotlivých tříd.

$$V_{CP} = \left(\frac{R_{CP}}{RA_{CP}} \right)$$

V_{CP} Významnost třídy C parametru P

R_{CP}Relativní zastoupení svahových pohybů v třídě C, parametru P

RA_{CP}Relativní plocha třídy C parametru P

Výsledná významnost se pohybuje v intervalu $<0;\infty>$. Čím jsou hodnoty blíže k nule, tím menší významnost daná třída má, naopak čím vyšší hodnoty tím vyšší významnost.

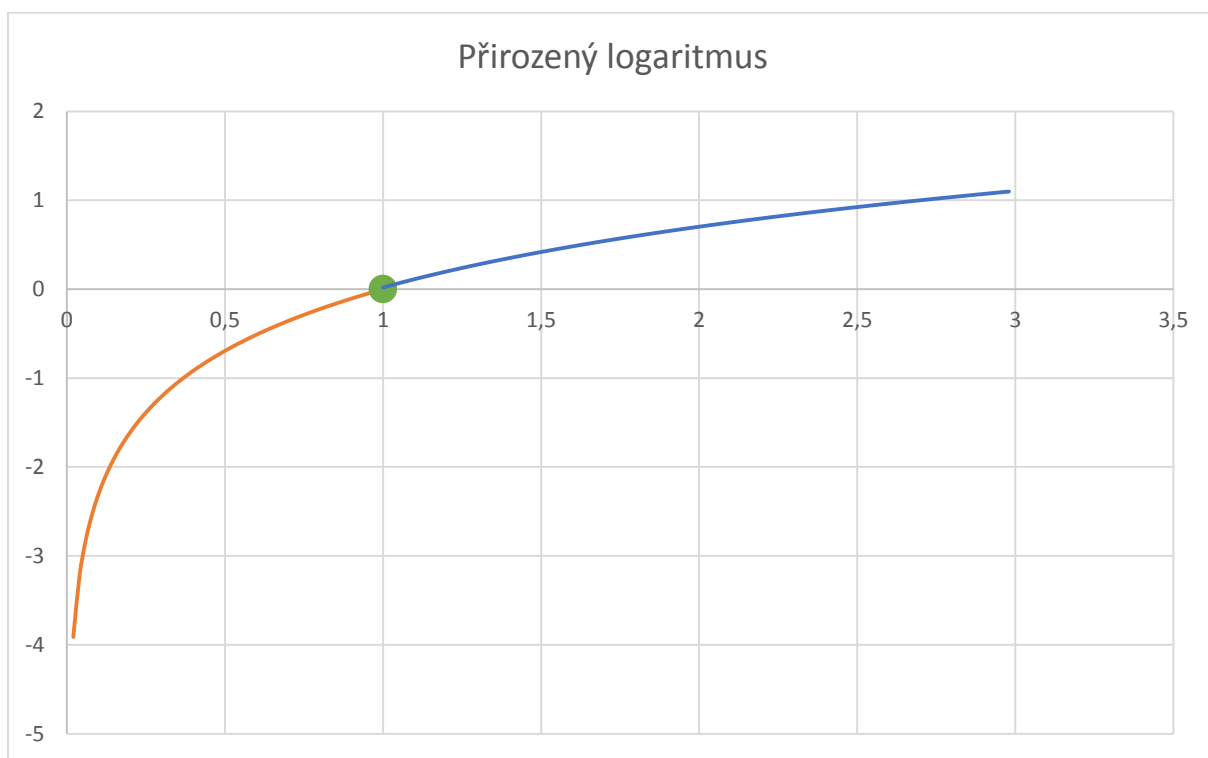
Tento vzorec reprezentuje mru očekávaného zastoupení svahových pohybů v dané třídě daného parametru. Pokud by tedy všechny třídy všech parametrů měly stejný vliv na výskyt svahových pohybů, pak by výsledné hodnoty byly 1. Jestliže relativní zastoupení svahových pohybů v dané třídě je vyšší než relativní zastoupení této třídy, znamená to, že daná třída poskytuje lepší podmínky pro jejich

výskyt, naopak pokud je relativní zastoupení svahových pohybů v dané třídě menší než 0, pak jsou podmínky pro výskyt nepříhodné.

Pro lepší znázornění příznivosti podmínek je možné tyto výsledky převést zavedením přirozeného logaritmu do vzorce.

$$V_{CP} = \ln\left(\frac{R_{CP}}{RA_{CP}}\right)$$

Jak je vidět z grafu, tak zavedením logaritmu se veškeré hodnoty menší než 1 změny na záporné, naopak vyšší než 1 budou kladné. Toto rozložení hodnot lépe vystihuje charakter výsledku. Záporné hodnoty – nepříznivé podmínky, kladné hodnoty – příznivé podmínky. Nevýhodou tohoto znázornění je však špatná aplikovatelnost hodnot pro další výpočty.



Graf 4: Graf funkce přirozeného logaritmu

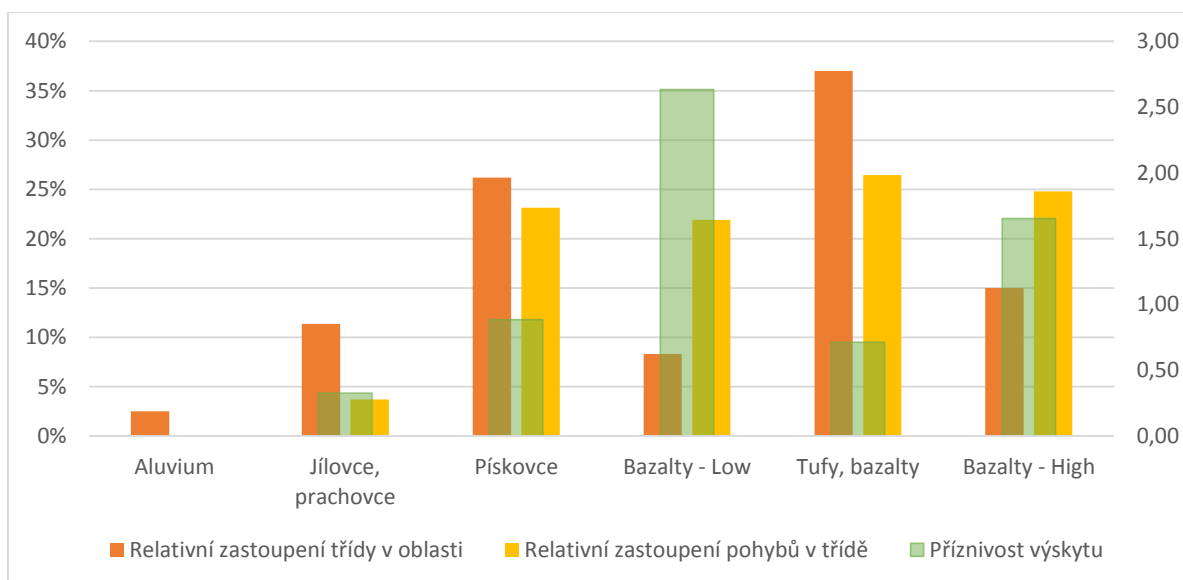
Jakmile byly určeny významnosti jednotlivých tříd, byly pomocí těchto výsledků určeny jejich nové hodnoty pro reklasifikaci na jednotné rozmezí 0-255. Tyto vrstvy pak posloužily jako finální vstup do váženého překryvu.

V následujících tabulkách a grafech jsou uvedeny hodnoty zastoupení jednotlivých tříd v oblasti, zastoupení svahových pohybů v dané třídě a dopočítané hodnoty významnosti.

Třída	ID třídy	Relativní zastoupení třídy v oblasti	Relativní zastoupení pohybů v třídě	Významnost V_{CP}	Logaritmus podílu	Pořadí (Sestupně)
Aluvium	1	3%	0%	0.00	-5	1
Jílovce, prachovce	2	11%	4%	0.33	-1.12	2
Pískovce	3	26%	23%	0.88	-0.12	4
Bazalty – Nižší	4	8%	22%	2.63	0.97	6
Tufy, bazalty	5	37%	26%	0.71	-0.34	3
Bazalty - Vyšší	6	15%	25%	1.65	0.50	5

Tabulka 12: Určení významnosti tříd parametru litologie

Jak je vidět z tabulky výše, nejvíce svahových pohybů bylo zaznamenáno Na vulkanických horninách, naopak žádný se nevyskytl na aluviálních uloženinách z důvodu nízkého zastoupení třídy a minimum na jílovcích a pískovcích. Největší zastoupení mají v oblasti tufy a bazalty, které zabírají více než třetinu území, následované pískovci, které zabírají přibližně čtvrtinu plochy. Největší podíl zastoupení mají nižší bazalty a tufy, jsou to tedy oblasti s nejpříznivějšími podmínkami pro výskyt svahového pohybu. Na aluviu se žádný pohyb nevyskytl, jelikož ale přirozený logaritmus není v 0 definován, je do tabulky doplněna hodnota -5, která sice neodpovídá limitnímu přibližování se nekonečnu, nicméně je to hodnota výrazně nižší než jakákoli dosažená hodnota a proto i přes matematickou nesprávnost dobře vyjadřuje postavení této třídy.

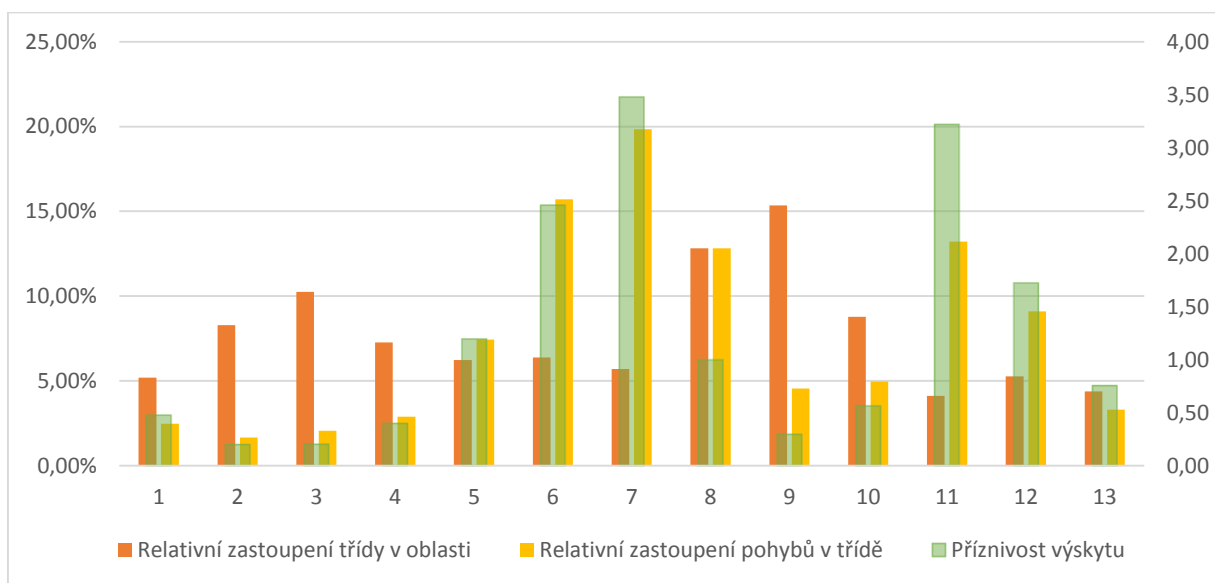


Graf 5: Zastoupení tříd v oblasti, zastoupení pohybů v třídě dle geologie a výsledná příznivost podmínek (vedlejší osa)

Níže uvedená tabulka a graf ukazují, že nejvyšší zastoupení mají třídy 8 a 9, což odpovídá výškám 2300 a 2400 m, další maximum je u třídy 3 (1700 m). Podobně také výskyt svahových pohybů má dvě maxima, první mezi 6. a 8. třídou, druhé pak 11. a 12. Statisticky nejlepší podmínky pro svahovou deformaci jsou v 6., 7. a 11. třídě.

Třída	Relativní zastoupení třídy v oblasti	Relativní zastoupení pohybů v třídě	Významnost V_{CP}	Logaritmus podílu	Pořadí (Sestupně)
1	5.19%	2.48%	0.48	-0.74	5
2	8.29%	1.65%	0.20	-1.61	1
3	10.25%	2.07%	0.20	-1.60	2
4	7.27%	2.89%	0.40	-0.92	4
5	6.22%	7.44%	1.20	0.18	9
6	6.39%	15.70%	2.46	0.90	11
7	5.70%	19.83%	3.48	1.25	13
8	12.81%	12.81%	1.00	-0.00	8
9	15.34%	4.55%	0.30	-1.22	3
10	8.79%	4.96%	0.56	-0.57	6
11	4.11%	13.22%	3.22	1.17	12
12	5.27%	9.09%	1.72	0.54	10
13	4.37%	3.31%	0.76	-0.28	7

Tabulka 13: Určení významnosti tříd parametru nadmořské výšky

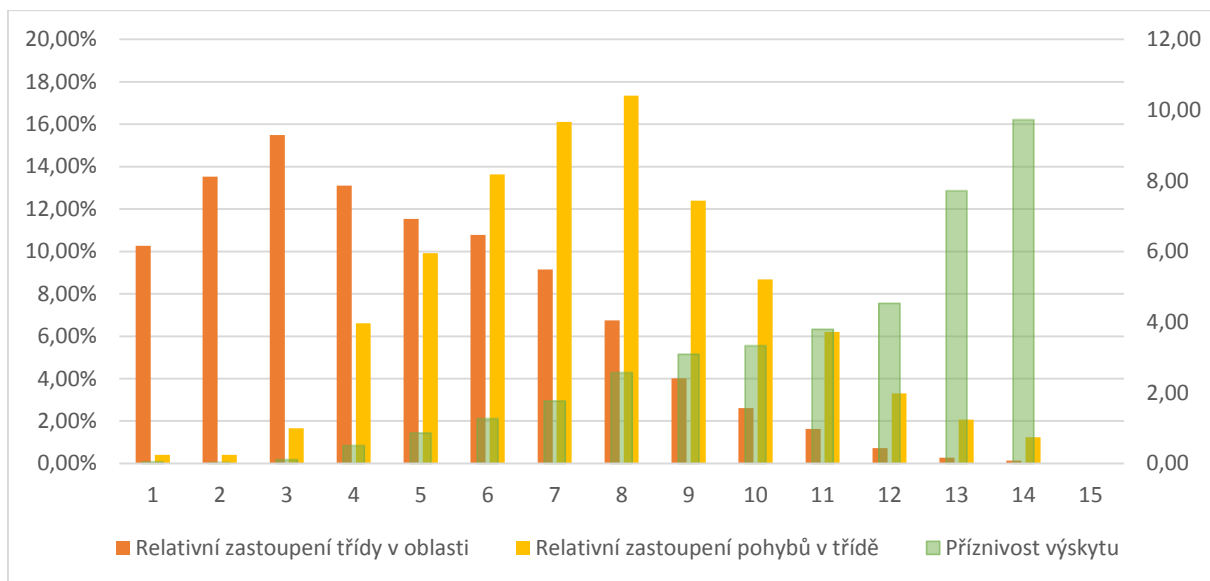


Graf 6: Zastoupení tříd v oblasti, zastoupení pohybů v třídě dle nadmořské výšky a výsledná příznivost výskytu (vedlejší osa)

Níže uvedená tabulka a graf ukazují, že nejvyšší zastoupení mají třídy 1 - 6, což odpovídá svahům do 30°. Toto rozložení je silně pravostranně asymetrické. Rozložení blízké normálnímu rozdělení má výskyt svahových pohybů, maximum je mezi 6. a 9. třídou, což odpovídá sklonům mezi 25° a 45°. Příznivost podmínek narůstá téměř exponenciálně s výrazným maximem na sklonech mezi 60° a 70°. Zajímavé je, že na sklonech přes 70° se již pohyby nevyskytují. Opět byla pro tuto třídu použita hodnota logaritmu -5, z výše popsaných důvodů.

Třída	Relativní zastoupení třídy v oblasti	Relativní zastoupení pohybů v třídě	Významnost V_{CP}	Logaritmus podílu	Pořadí (Sestupně)
1	10.27%	0.41%	0.04	-3.21	3
2	13.53%	0.41%	0.03	-3.49	2
3	15.49%	1.65%	0.11	-2.24	4
4	13.10%	6.61%	0.50	-0.68	5
5	11.54%	9.92%	0.86	-0.15	6
6	10.79%	13.64%	1.26	0.23	7
7	9.15%	16.12%	1.76	0.57	8
8	6.75%	17.36%	2.57	0.95	9
9	4.01%	12.40%	3.09	1.13	10
10	2.60%	8.68%	3.33	1.20	11
11	1.63%	6.20%	3.79	1.33	12
12	0.73%	3.31%	4.53	1.51	13
13	0.27%	2.07%	7.72	2.04	14
14	0.13%	1.24%	9.73	2.28	14
15	0.02%	0.00%	0.00	-5.00	1

Tabulka 14: Určení významnosti tříd parametru sklonitosti

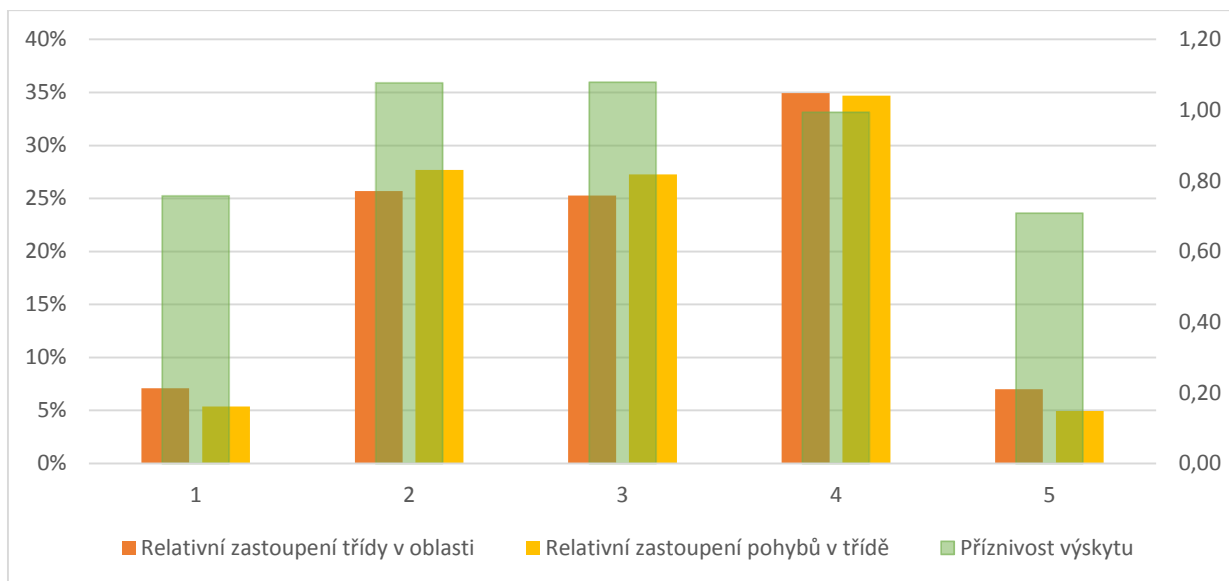


Graf 7: Zastoupení tříd v oblasti a zastoupení pohybů v třídě dle sklonitosti a výsledná příznivost výskytu (vedlejší osa)

Níže uvedená tabulka a graf ukazují, že nejvyšší zastoupení má 4. třída, což odpovídá vzdálenosti do 2500 m. Rozložení pohybů do tříd má minima v extrémních hodnotách, což odpovídá i jejich zastoupení v celé oblasti. Maximum je opět ve 4. třídě. Co se týká příznivosti podmínek pro výskyt pohybu, nedá se říci, že by některá z tříd měla výraznější vliv. Nejvyšší hodnoty jsou v 2. a 3. třídě, což odpovídá i vysvětlení popsanému výše.

Třída	Relativní zastoupení třídy v oblasti	Relativní zastoupení pohybů v třídě	Významnost V_{CP}	Logaritmus podílu	Pořadí (Sestupně)
1	7%	5%	0.76	-0.28	2
2	26%	28%	1.08	0.07	4
3	25%	27%	1.08	0.08	5
4	35%	35%	0.99	-0.01	3
5	7%	5%	0.71	-0.34	1

Tabulka 15: Určení významnosti tříd parametru vzdálenosti od vodního toku

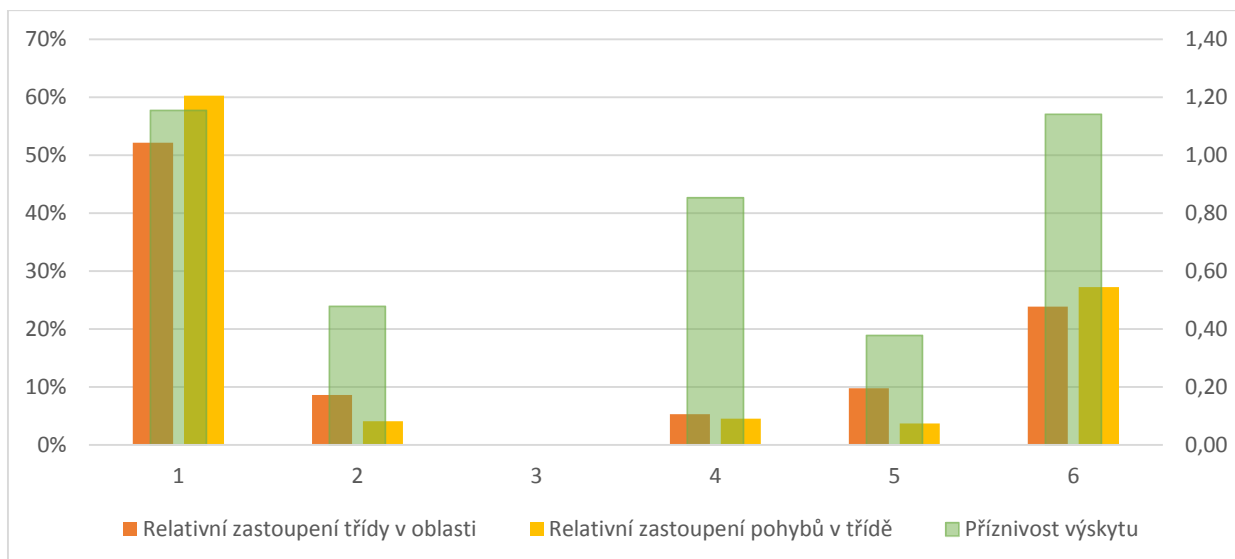


Graf 8: Zastoupení tříd v oblasti a zastoupení pohybů v třídě dle vzdálenosti od vodního toku a výsledná příznivost výskytu (vedlejší osa)

Co se týká land coveru, žádná ze tříd nevykazuje výrazně vyšší vliv na výskyt. Třída křovin a mozaika orné půdy s vegetací mají mírně vyšší hodnoty. Na holých površích nebyl nalezen ani jeden svahový pohyb.

Třída	Relativní zastoupení třídy v oblasti	Relativní zastoupení pohybů v třídě	Významnost V_{CP}	Logaritmus podílu	Pořadí (Sestupně)
1	52%	60%	1.16	0.14	6
2	9%	4%	0.48	-0.74	3
3	0.1%	0%	0.00	-5.00	1
4	5%	5%	0.85	-0.16	4
5	10%	4%	0.38	-0.97	2
6	24%	27%	1.14	0.13	5

Tabulka 16: Určení významnosti tříd parametru Land Cover

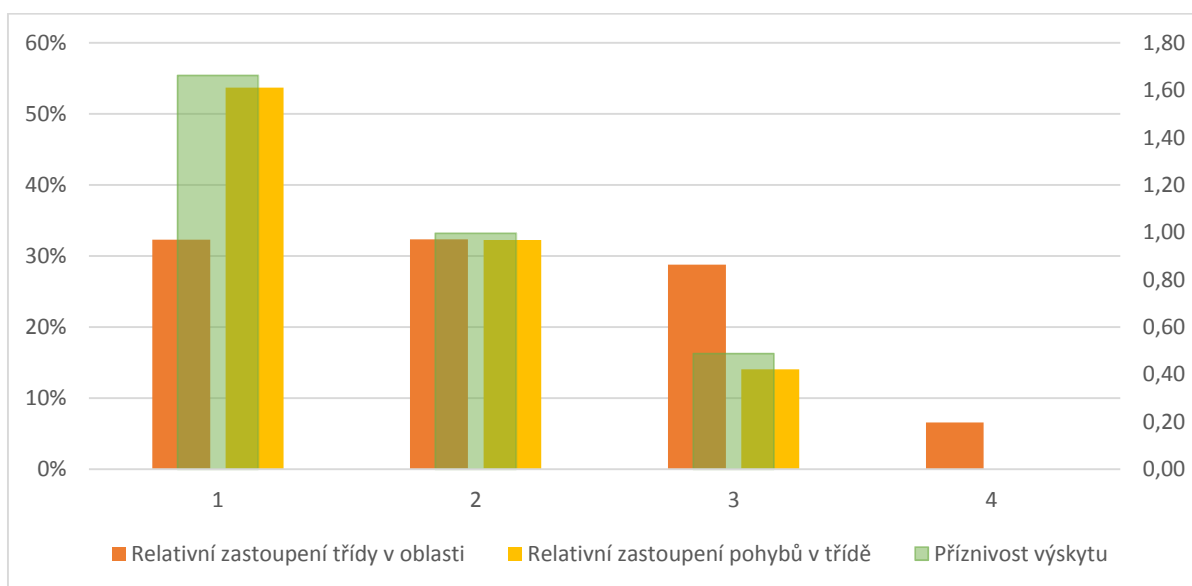


Graf 9: Zastoupení tříd v oblasti a zastoupení pohybů v třídě dle Land Cover a výsledná příznivost výskytu (vedlejší osa)

Posledním faktorem je vzdálenost od geologického rozhraní. Dle předpokladu je 1. třída (do 100m) tou nejvýznamnější a s rostoucí vzdáleností významnost klesá. Nejbližší okolí rozhraní má tedy nejpríznivější podmínky.

Třída	Relativní zastoupení třídy v oblasti	Relativní zastoupení pohybů v třídě	Významnost V_{CP}	Logaritmus podílu	Pořadí (Sestupně)
1	32%	54%	1.66	0.51	4
2	32%	32%	1.00	-0.00	3
3	29%	14%	0.49	-0.72	2
4	7%	0%	0.00	-5.00	1

Tabulka 17: Určení významnosti tříd parametru vzdálenosti od geologického rozhraní



Graf 10: Zastoupení tříd v oblasti a zastoupení pohybů v třídě dle vzdálenosti od geologického rozhraní a výsledná příznivost výskytu (vedlejší osa)

5.3.8 Stanovení vah parametru

Váha parametru byla určena podle následujícího vzorce:

$$V_P = \frac{1}{n} \sum_{P=1}^n V_{CP}$$

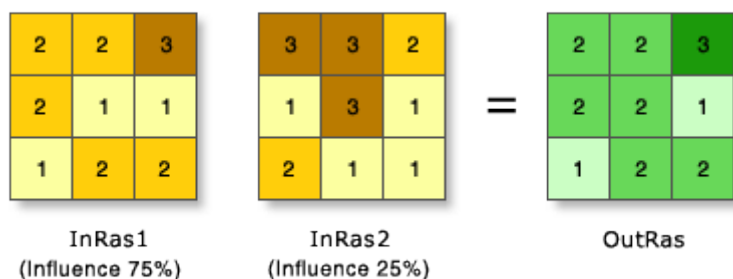
jako průměr významnosti jednotlivých tříd parametru. Přehled výsledných vah je v tabulce níže

	Suma významností	Počet tříd	Průměrná významnost	Pořadí parametru	Relativní významnost V_{RP}
Litologie	6.21	6	1.04	4	14%
Nadmořská výška	15.97	13	1.23	5	16%
Sklonitost	39.34	14	2.81	6	38%
Vzdálenost od vodního toku	4.62	5	0.92	3	12%
Land Cover	4.01	6	0.67	1	9%
Vzdálenost od geologického rozhraní	3.15	4	0.79	2	11%

Tabulka 18: Určení vah parametru

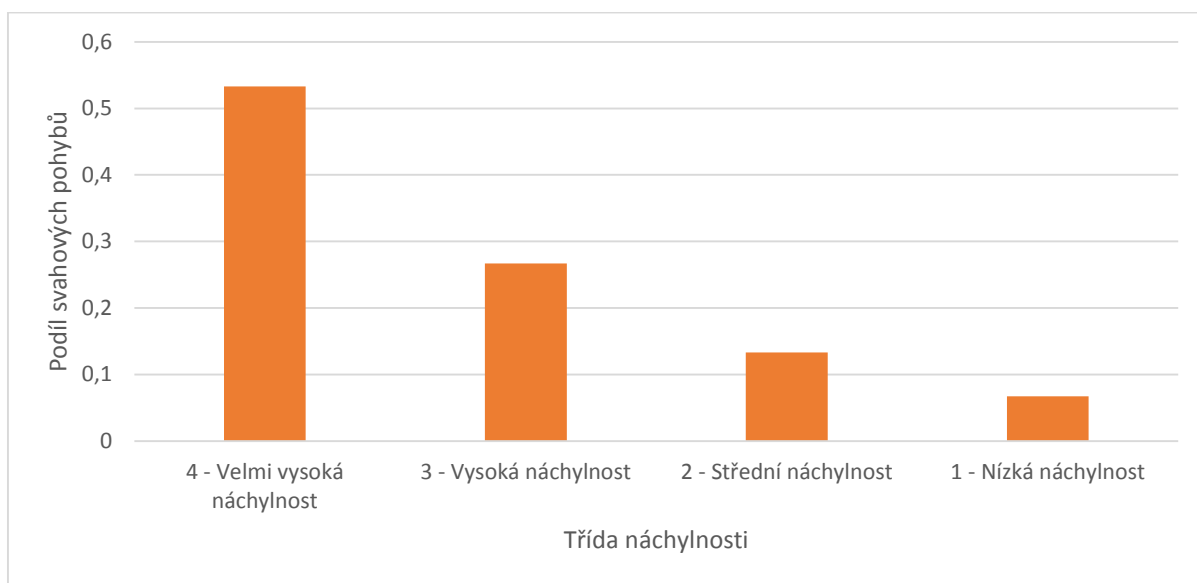
5.3.9 Vážený překryv

Pro tvorbu finálního modelu byla použita již popsaná metodika LSI – Landslide Susceptibility Index, kdy je pro každý pixel rastru dopočítána hodnota náchylnosti. Pro výpočet LSI byla použita funkce Weighted overlay – vážený překryv jejíž vstupy byly: váhy parametrů a reklasifikované vrstvy dle významnosti jednotlivých tříd. Jak již bylo řečeno, funkce váženého překryvu bere vstupující vrstvy a na základě přidělených vah jednotlivých rastrů a jejich hodnot určí hodnotu každého pixelu výsledného rastru viz obr. níže.



Obrázek 40: Znáznornění průběhu Weighted Overlay, nalevo jsou vstupující rastry a jejich významnost (75 a 25%), napravo výsledný rastr, <http://help.arcgis.com>

Takto vzniklý vážený rastr, byl opět podroben reklasifikaci, abychom dostali finální mapu zonálnosti. Na reklasifikaci byla použita metodika dle Galanga (2004). Třída s nejvyšší náchylností obsahuje 2x více svahových deformací než třída o jeden stupeň nižší a tak dále. S každým poklesem úrovně je poloviční počet svahových pohybů v ní. Tedy v třídě Velmi vysoká náchylnost leží 2x více svahových pohybů než v třídě Vysoká náchylnost, ve které je 2x více svahových pohybů než v třídě Střední náchylnost, ve které je jich 2x více než v třídě Nízká náchylnost.



Graf 11: Rozložení tříd náchylnosti dle počtu svahových pohybů

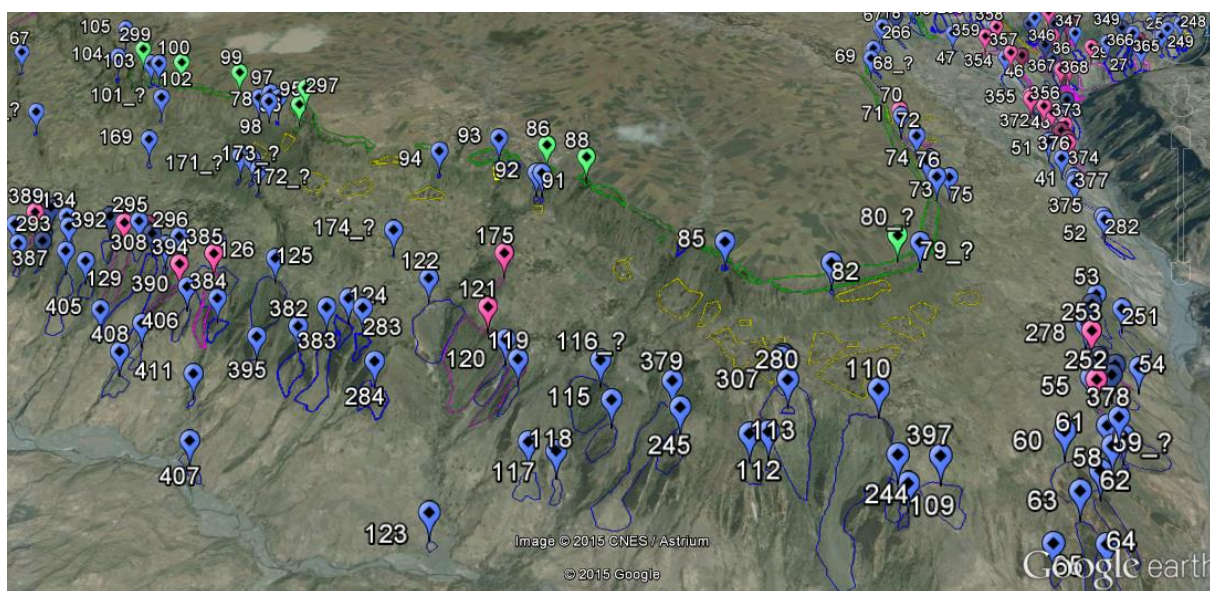
5.4 Fáze – Verifikační

V této fázi byl model aplikován na vrstvu s náhodným výběrem svahových deformací, kde by se mělo prokázat, že významná část deformací leží v oblasti s nejvyšší náchylností. Tento náhodný výběr byl na začátku extrahován z celého datasetu svahových deformací. Jedná se o 42 náhodně vybraných pohybů, 36 z nich jsou sesuvy, 5 proudových pohybů a 1 řícení.

6. Výsledky práce

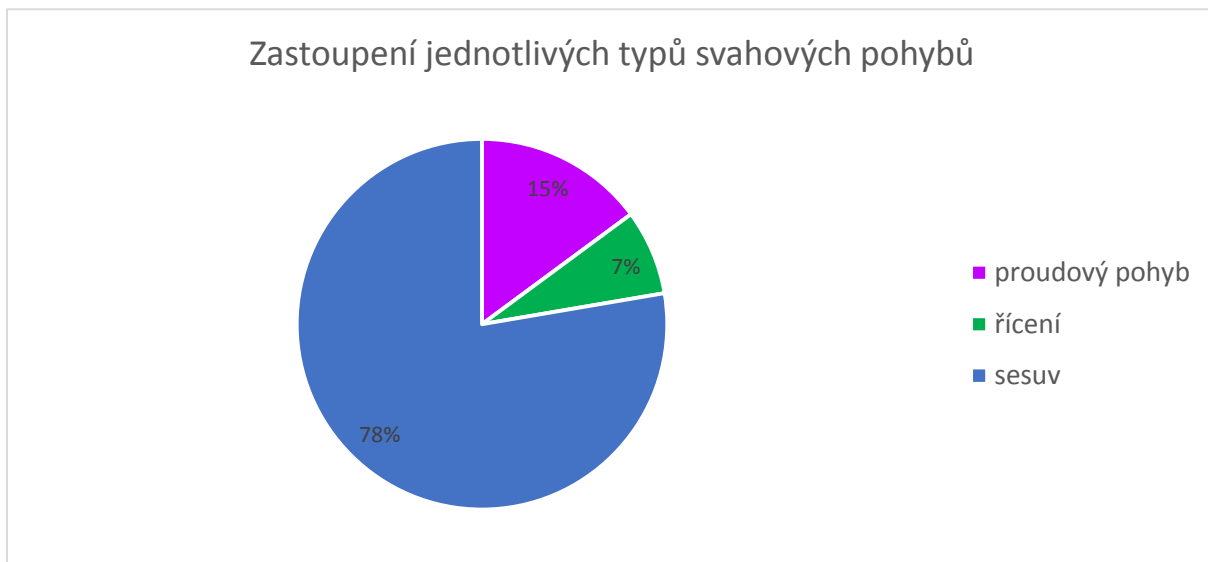
6.1 Datová fáze

Celkem bylo vymapováno 242 svahových deformací a ty byly rozděleny do tří skupin: řícení, sesuvy a proudové pohyby. V první fázi byly deformace mapovány jako polygony, ale ty byly v průběhu nahrazeny bodovými značkami. Tyto značky byly umísťovány do oblasti odlučné hrany. Tato změna byla způsobena především různorodou kvalitou snímků, kdy nebylo přesně možné identifikovat rozsah deformace. Dalším důvodem pro bodové značky byla možnost snazší interpretace výsledků, např. porovnání plošné distribuce s geologickým podložím. Posledním důvodem pak bylo následné použití této vrstvy pro tvorbu a verifikaci modelu.

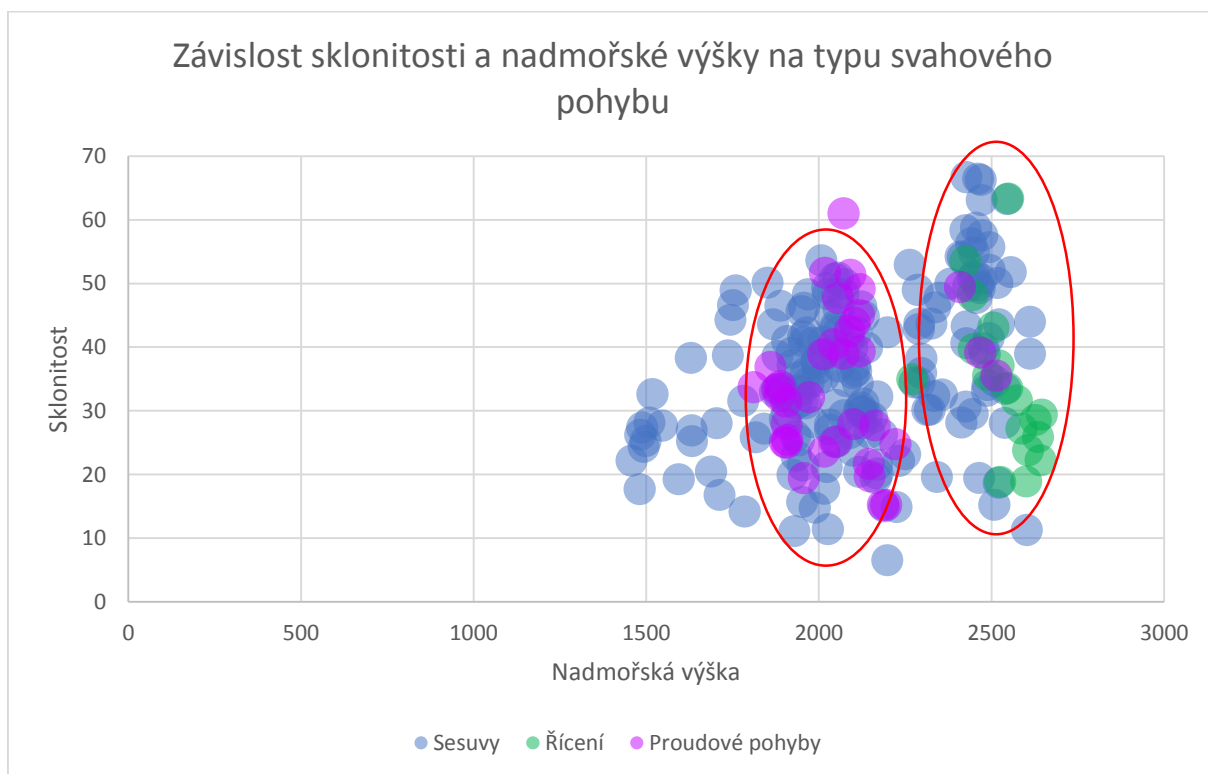


Obrázek 41: Ukázka vizualizace v Google Earth

V následujícím grafu je znázorněno rozložení svahových deformací dle mechanismu pohybu. 188 z 242 (78%) pohybů představují sesuvy a to bez ohledu na transportovaný materiál. Nicméně nejvíce se vyskytovali tzv. debris slide. Druhou nejčetnější skupinou jsou proudové pohyby, těch bylo vymapováno 36 (15%). Jedná se o rychlé proudové pohyby, jejichž výskyt je zde většinou vázán na strže či úzká údolí. Poslední skupinou jsou řícení, kterých bylo 18 (7%).



Graf 12: Zastoupení jednotlivých typů svahových pohybů

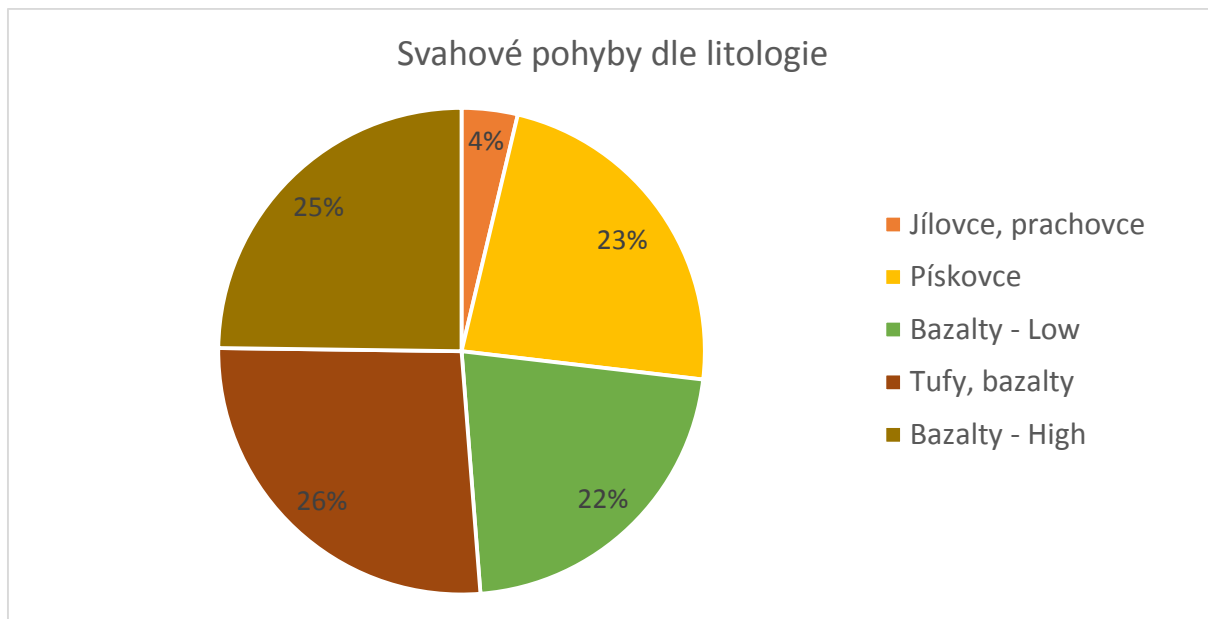


Graf 13: Závislost sklonitosti a nadmořské výšky na typu svahového pohybu

Z výše uvedeného grafu jsou patrné dva trendy rozložení svahových pohybů v oblasti. Řícení jsou situována v pravé části grafu – vysoké nadmořské výšky a vyšší sklonitost. Druhým trendem jsou

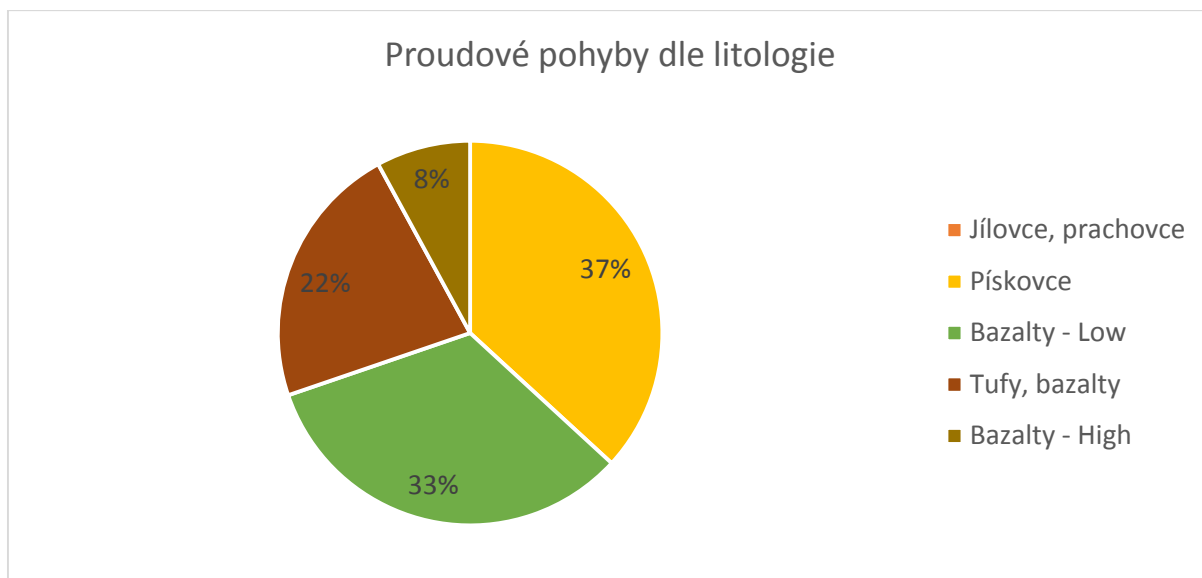
proudové pohyby ve výškách mezi 1800 a 2100 m na sklonech mezi 20 a 40°. Dalším zjištěním je snížená frekvence výskytu deformací ve výškách mezi 2100 a 2300 m. Tyto výsledky podporují výsledky dalších prací z oblasti Etiopské vysočiny např. Abebe et al. (2010), Ayalew (2010), Temesgen et al. (2001), Ayalew, Temesgen (1995), Moeyersons et al. (2008)

Jak je vidět z grafu níže téměř tři čtvrtiny všech pohybů se vyskytly na třetihorních vulkanitech, ať už na bazaltech jakékoli úrovně nebo na méně odolných tufech. Nejnižší zastoupení je pak na nejméně odolných prachovcích a jílovcích (2%). Necelá čtvrtina pohybů (23%) se pak nachází na pískovcích.



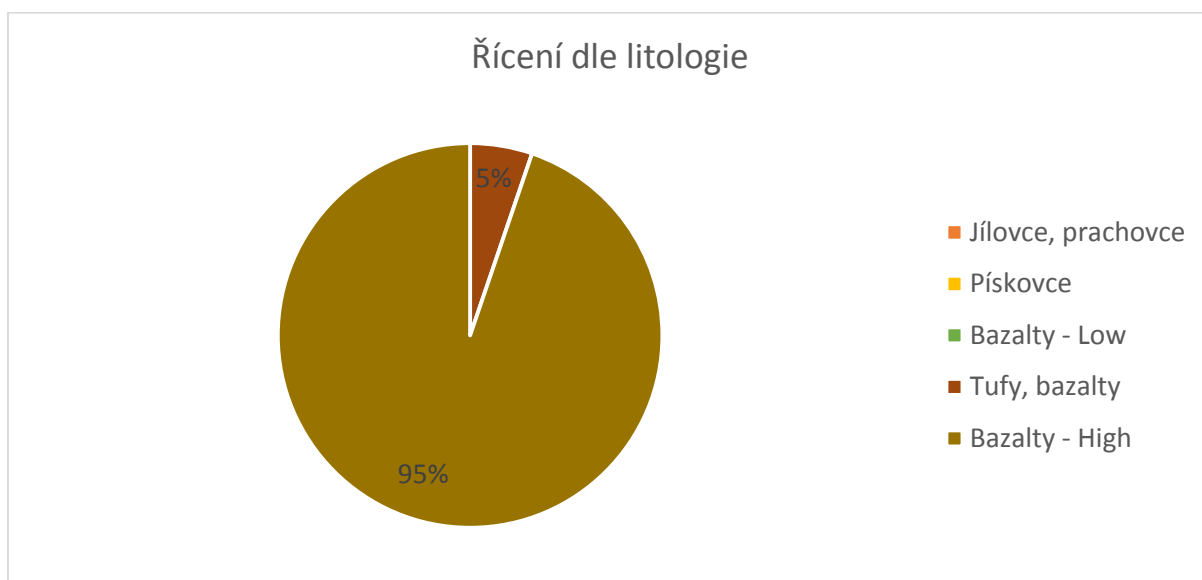
Graf 14: Svahové pohyby dle litologie

Co se proudových pohybů týče, žádný proudový pohyb nebyl identifikován na jílovcích a prachovcích, přibližně dvě třetiny pohybů se vyskytly na terciárních vulkanitech s maximem na nižších bazaltech. 37% proudových pohybů je situováno na pískovcích.



Graf 15: Proudové pohyby dle litologie

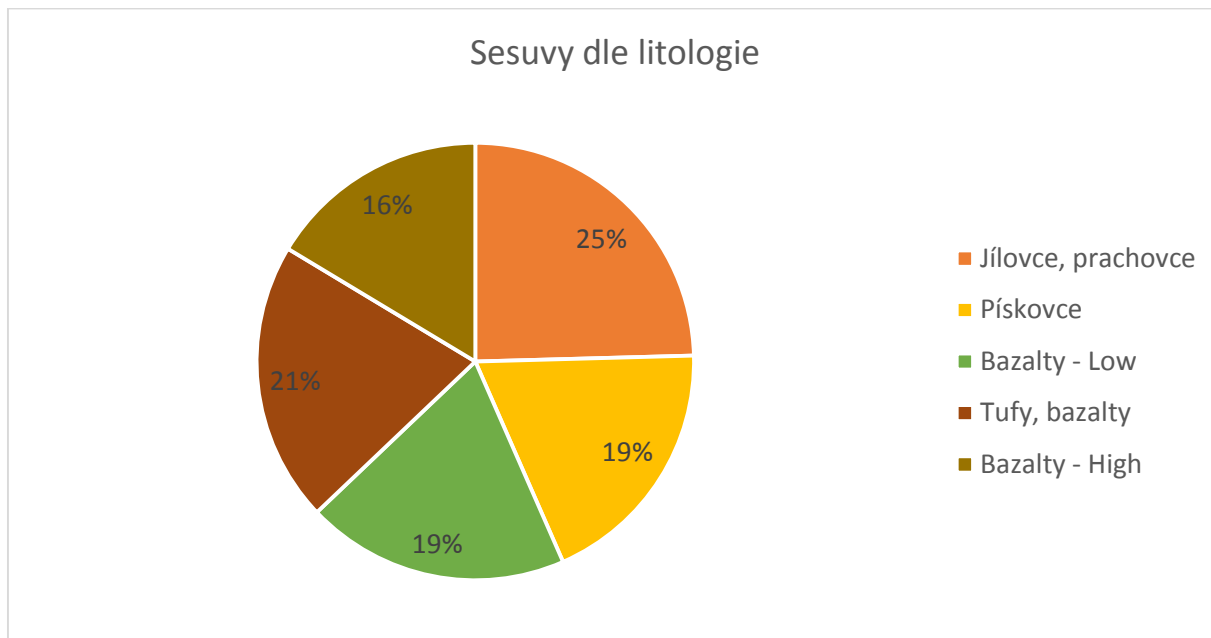
Všechna identifikovaná říční v této oblasti jsou lokalizována na vulkanitech, s tím, že naprostá většina z nich (95%) na vyšších bazaltech. Nebyl identifikován jediný výskyt říční na druhohorních usazeninách. Většina říční se vyskytla na svazích s vysokým sklonem ve vyšších nadmořských výškách. Druhohorní usazeniny se vyskytují spíše v nižších částech údolí, zde ve vyšších partiích byly překryty vrstvami třetihorních vulkanických proudů.



Graf 16: Říční dle litologie

Sesuvy představují největší zastoupení našeho vzorku, jejich plošná distribuce nemá, co se týká nadmořské výšky ani sklonitosti, žádná zjevná pravidla a podobně je tomu také u litologie. Necelá polovina případů se vyskytuje na druhohorních usazeninách, zbytek na terciálních vulkanitech.

Největší frekvence výskytu pohybů je na prachovcích a jílovcích (25%). Sesuvy jsou jediným typem pohybu v této lokalitě, který se vyskytuje na těchto horninách. Nejmenší horninové zastoupení mají sesuvy na nižších a vyšších bazaltech. To je způsobeno především vyššími nadmořskými výškami a sklony, ve kterých tyto horniny jsou uloženy, což podporuje vyšší výskyt řícení.



Graf 17: Sesuvy dle litologie

Zajímavým faktem je také, že 130 z celkového počtu 242 pohybů se vyskytuje do 100 metrů od geologického rozhraní. Ve většině případů se jedná o rozhraní vulkanitů, což koresponduje s popisovaným mechanismem pohybů a zjištěními dalších autorů např. Temesgen et al. (2001), Ayalew, Temesgen (1995), Moeyersons et al. (2008), Ayalew (2010).

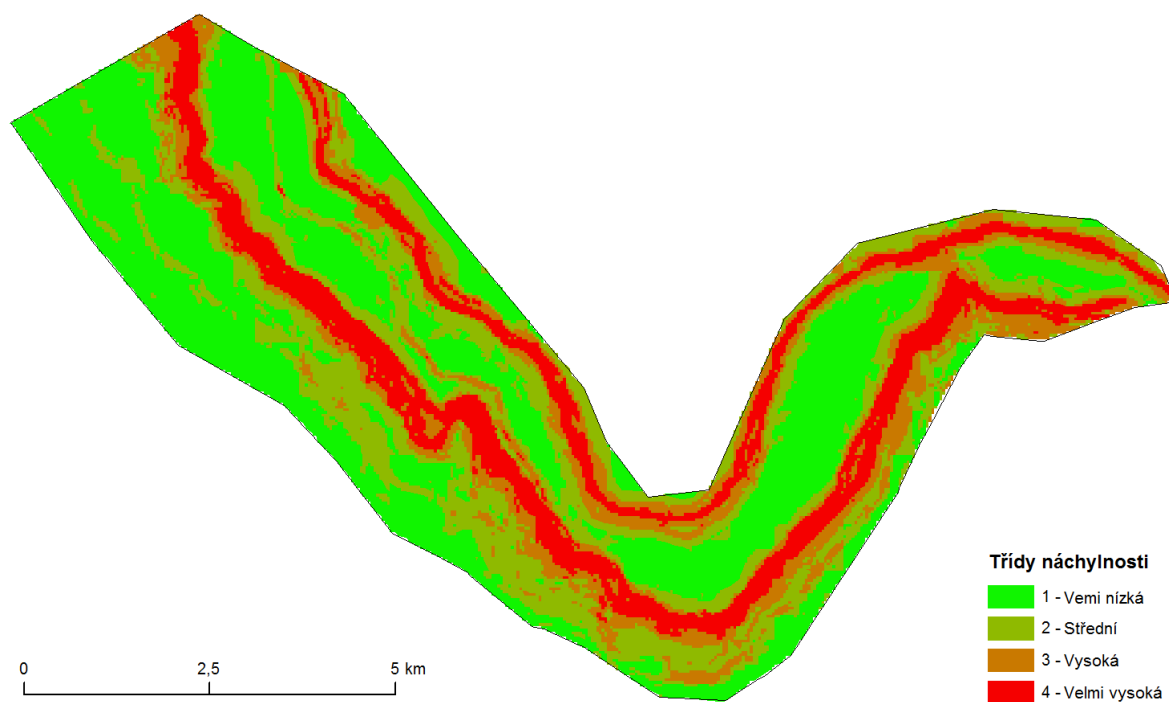
6.2 Modelovací fáze

V následující tabulce jsou výsledné váhy vstupujících faktorů. Největší vliv ve vytvořeném modelu má jednoznačně vrstva sklonitosti. Naopak nejmenší pak landcover. Nicméně stejně důležité jako váhy samotných faktorů jsou také významnosti jednotlivých tříd v nich.

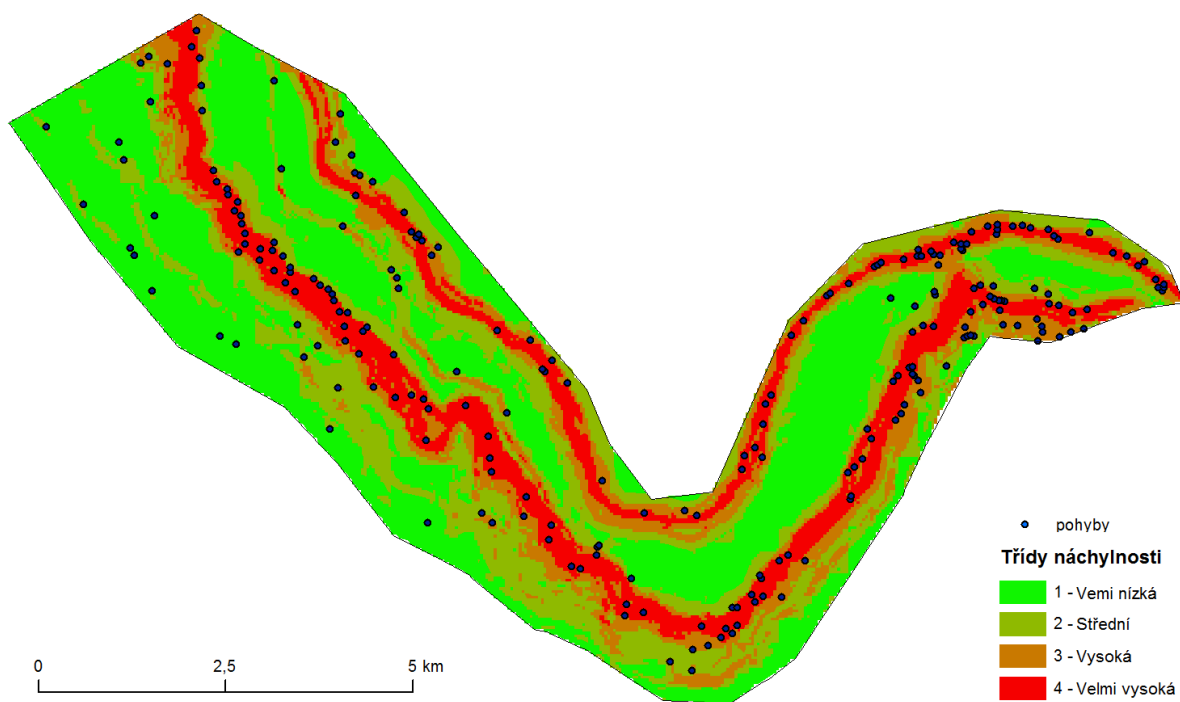
Faktor	Relativní významnost V_{RP}
Litologie	14%
Nadmořská výška	16%
Sklonitost	38%
Vzdálenost od vodního toku	12%
Land Cover	9%

Tabulka 19: Přehled finálních vah jednotlivých vstupujících parametrů

Níže jsou vidět výsledné mapy náchylnosti s vyznačenými svahovými pohyby a bez nich



Obrázek 42: Výsledná mapa náchylnosti, rozdělená do 4 skupin



Obrázek 43: Výsledná mapa náchylnosti, rozdělená do 4 skupin s vyznačenými svahovými pohyby

Už při prvním pohledu na mapy je patrné rozložení plochy v jednotlivých třídách, dominantní je třída s nejnižší náchylností, která se vyskytuje především na samém údolním dně a na rovinách teras. Přesná čísla jsou uvedena v tabulce níže.

Třída náchylnosti	Relativní plošné zastoupení
1 - Nízká	40%
2 - Střední	27%
3 - Vysoká	16%
4 - Velmi vysoká	17%

Tabulka 20: Zastoupení jednotlivých tříd náchylnosti ve zkoumané oblasti

V následující tabulce je znázorněno rozložení svahových pohybů dle typu do tříd náchylnosti. Je vidět, že skutečné zastoupení svahových pohybů ve třídách téměř odpovídá ideálnímu modelovému.

Třída náchylnosti	Teoretické zastoupení	Skutečné zastoupení
1 - Nízká	6.7%	6.6%
2 - Střední	13.3%	13.6%
3 - Vysoká	26.7%	27.3%
4 - Velmi vysoká	53.3%	52.5%

Tabulka 21: Srovnání teoretického a skutečného rozdělení svahových pohybů do tříd náchylnosti

Následující tabulka ukazuje distribuci svahových pohybů dle typu do tříd náchylnosti. Z těchto dat lze určit, že modelované četnosti nejlépe odpovídají v případě sesuvů, což je způsobeno největším zastoupením tohoto typu v datovém souboru, naopak nejmenší shoda je v případě řícení, která jsou zastoupena nejméně.

Typ pohybu/Třída náchylnosti	1 - Nízká	2 – Střední	3 – Vysoká	4 – Velmi vysoká
sesuv	8%	12%	27%	54%
řícení	0%	33%	28%	39%
proudový pohyb	3%	14%	31%	53%

Tabulka 22: Distribuce svahových pohybů dle typu do tříd náchylnosti

Tato vytvořená metodika je ryze objektivní, přesně daná pomocí série jasně definovaných matematických výpočtů. Tím jsou odstraněny jakékoli možnosti subjektivních zásahů a ovlivňování výsledků. Důsledkem tohoto je aplikovatelnost metodiky na jakoukoli oblast světa pro niž máme dostupná data. S ohledem na technologický pokrok dnes máme velké množství takových dat ve vhodném rozlišení volně k dispozici, např. digitální model terénu od USGS. Nejvýznamnějším

ovlivňujícím činitelem jsou samotné mapovací práce, při nichž jsou lokalizovány svahové deformace v oblasti (Klimeš 2003). Kvalita a přesnost těchto dat je naprosto klíčová pro dosažení správných výsledků a to především proto, že další postup je pevně stanoven. Velice vhodným doplněním je verifikace těchto dat v terénu. Další částí modelu jsou ostatní datové vrstvy vůči nimž se svahové deformace vztahují. Tyto vstupující faktory nejsou omezeny na v této práci použitý seznam, ale může jich být libovolný počet. Hlavním faktorem určujícím vstupy je rozlišení a dostupnost těchto dat. Tato problematika je podrobněji rozebrána v diskuzi.

6.3 Verifikační fáze

Testovací dataset obsahoval 42 náhodně vybraných pohybů, 36 z nich jsou sesuvy, 5 proudových pohybů a 1 řícení. Tabulka níže ukazuje jejich skutečné zastoupení do tříd ve srovnání s teoretickým. Zastoupení třídy velmi vysoké náchylnosti je mírně nadhodnoceno na úkor nižších tříd, nicméně výběr odpovídá celému souboru a je reprezentativní.

Třída náchylnosti	Teoretické zastoupení	Skutečné zastoupení
1 - Nízká	6.7%	4.8%
2 - Střední	13.3%	9.5%
3 - Vysoká	26.7%	26.2%
4 - Velmi vysoká	53.3%	59.5%

Tabulka 23: Srovnání teoretického a skutečného rozdělení verifikačních svahových pohybů do tříd náchylnosti

7. Diskuze

Výsledky zjištěné v datové fázi byly konfrontovány s výsledky zahraničních autorů zabývajících se touto oblastí. Více než polovina lokalizovaných deformací se vyskytuje do 100m od geologického rozhraní, což koresponduje s popisovaným mechanismem pohybu dalšími autory (Temesgen et al. (2001), Ayalew, Temesgen (1995), Moeyersons et al. (2008), Ayalew (2010).

Říčení jsou situována do vysokých nadmořských výšek (přes 2500 m) a velkých sklonů. K obdobným výsledkům v oblasti Etiopské vysočiny došli také autoři: Abebe et al. (2010), Ayalew (2010), Temesgen et al. (2001), Ayalew, Temesgen (1995), Moeyersons et al. (2008), Asfaw (2010).

Vliv vzdálenosti k vodnímu toku a ke geologickému rozhraní odpovídá výsledkům Ayele et al. (2014). V případě vzdálenosti ke geologickému rozhraní jsou výsledky v podstatě totožné 10.3% vs. 11%. Vzdálenosti k vodnímu toku přikládají vliv 17%, v mých výsledcích pak 12%. Autoři však neberou ohled na problém liniově mapovaných vodních toků, na který jsem poukazoval v textu. Asfaw (2010) také zahrnul tento faktor do své analýzy a jeho výsledky odpovídají mému tvrzení, že v pásmu nejbližší vodnímu toku bude deformací málo. Co se týká odlišností ostatních parametrů, Ayele et al. (2014) přikládají výrazně menší vliv sklonitosti (17%) a naopak vyšší vliv litologie (24%).

Jak již bylo uvedeno, vytvořený model dobře reprezentuje rozložení svahových pohybů v oblasti. Jelikož vytvořená metodika je univerzální a všechny výpočty jsou určovány jednotnými matematickými kroky, je tato metodika použitelná také v jiných oblastech světa. Jelikož se ale jedná o zjednodušení reality, je nutné k výsledkům tak přistupovat. Dále bych tu chtěl upozornit na další fakta týkající se dat, která se projevila na mých výsledcích.

Datové podklady, se kterými jsem pracoval, mají různá rozlišení a přesnost, což zásadně ovlivňuje dosažené výsledky. Například použitý digitální model terénu s rozlišením 30m, ze kterého byl vytvořen rastr sklonitosti, generuje nejvyšší sklony v oblasti do 75°. V terénu bylo prokazatelně zjištěno, že se v oblasti vyskytují místa se sklony vyššími, což je patrné i na fotografiích v této práci. To je způsobeno způsobem výpočtu sklonitosti a rozlišením vstupujícího digitálního modelu což vede ke zhlazování extrémních hodnot. Samozřejmě také nelze použít data s měřítky výrazně menšími, než s jakými jsou prováděny mapovací práce. To je případ vrstvy Land Cover, která má opravdu hraniční rozlišení. S ohledem na nízkou variabilitu krajinného pokryvu a podobnost jednotlivých tříd ale bylo možno použít i tento mapový podklad s horším rozlišením. Vrstvy s ještě menším měřítkem by byly nepoužitelné, protože by neposkytovaly dostatečně přesnou informaci pro distribuci deformací. Dále byl v textu nastíněn problém relativní vs. absolutní nadmořské výšky. Jsem si vědom, že relativní

nadmořská výška by byla vhodnějším vstupem, ale s ohledem na metodiku byla v modelu použita výška absolutní. Hlavním problémem by byla náročnost přípravy vrstvy relativní výšky pro model, resp. určení zastoupení jejích jednotlivých tříd. V textu bylo také upozorněno na nedokonalost liniové vrstvy vodních toků, i když v realitě je koryto vodního toku prvek areálový. Moje metodika ale nepracuje s očekávaným vlivem faktorů, (např. s rostoucím sklonem roste náchylnost, s rostoucí vzdáleností klesá) jako jiní autoři (Ayele et al. 2014), ale statisticky ho určuje dle reality. Tím se tomuto problému elegantně vyhýbá a nepřidává tak do modelu další nepřesnosti.

Pravděpodobně nejdůležitější částí modelu byly ale mapovací práce (Klimeš 2003), během kterých byly svahové pohyby lokalizovány. Původně bylo prováděno mapování deformací jako areálových prvků, ale s ohledem na měřítko ostatních datových podkladů byly poté použity jako prvky bodové (v odlučné oblasti). Pro zajištění kvality tohoto výstupu bylo použito několik časových řezů, které Google Earth nabízí. Možnost porovnání více časových řezů se v jednom pohledu jeví jako výhoda, ale na druhou stranu je také nevýhodou. Je vždy třeba mapovat v nejnovějším datovém řezu a starší využívat spíše jako pomocné. Pokud by bylo mapováno i ve starších mapových řezech, byla by verifikace, především starších deformací v terénu velice obtížná. Tím se dostáváme k terénním pracím, během kterých byla ověřována přítomnost vymapovaných deformací. Identifikace svahových pohybů z družicových snímků je samozřejmě možná, ale nejistota plynoucí z kvality snímků je značná. Proto bych tuto metodiku obecně doporučil spíše pro menší oblasti. Samotné mapování z družicových snímků je časově náročné, a čím větší je oblast a počet deformací, tím náročnější je i následná terénní verifikace.

Samotné modelovací práce v podstatě navazují na problémy z fáze datové. Projevuje se zde především rozlišení vstupních dat. Nicméně výsledky dobře odpovídají skutečné distribuci svahových pohybů v této oblasti. Také plošně vymezení jednotlivých tříd naznačuje jejich reprezentativnost. Třída nejnížší náchylnosti pokrývá 40% oblasti, naopak třída s nejvyšší náchylností pouze 17%. Nedošlo, tedy ke zbytečně širokému vymezení této třídy, ale i přesto na těchto 17% území je lokalizováno více než 50% všech svahových pohybů. Naopak v třídě s nejnížší náchylností pouze necelých 7%.

Vytvořená metodika je aplikovatelná na bodové značky, ale i na areálové prvky, kde místo relativního zastoupení (počet výskytů) bude do modelu vstupovat relativní plocha, na které se rozkládají. Tuto variantu vidím jako jedno z možných vylepšení tohoto modelu v případě, že budou dostupné ostatní vrstvy v odpovídajícím rozlišení. Dle využití je další možností zpřesnění modelu aplikace na různé datové sady svahových pohybů, tím je myšleno vytvoření separátní mapy náchylnosti pro sesuvy, řícení a proudové pohyby. Pro takovéto rozšíření by však bylo třeba větší množství mapovaných prvků. Pro obecnou informaci, které oblasti jsou pro obyvatele nebezpečné, však postačuje použití společného datového souboru. Jako silnou stránku metodiky bych také označil možnost její kompletní

automatizace (pokud pomineme mapování deformací). Všechny následné procedury lze automatizovat například vytvořením modelu v Model Builderu v programu ArcGis. Tento krok by umožnil podstatné zrychlení tvorby výstupů, kdy by stačilo zadat pouze vstupní vrstvy a model by mapu náchylnosti vygeneroval automaticky.

Vytvořenou metodiku nelze přebírat jen částečně, například použít pouze významnost jednotlivých vah, jelikož ta je určena matematicky a je významně specifická pro zkoumanou oblast.

8. Závěr

Oblast této práce je situována do jedné z nejchudších zemí světa, Etiopie. Obyvatelé Etiopie jsou závislí na vlastní zemědělské činnosti, infrastruktura není příliš rozvinutá a tak se obchod odehrává spíše v lokálním měřítku. K těmto faktorům se přidávají také katastrofické zásahy přírodních procesů, kterým jsou obyvatelé vystaveni prakticky denně. Jedním z nich jsou svahové pohyby, které v této oblasti mají za následek obrovské materiální škody, ale také lidská úmrtí. Dopady těchto škod jsou obrovské a mohou být pro místní i existenční. Bez znalosti náchylnosti k těmto pohybům, není možné jim účinně předcházet.

Cílem teoretické části této práce byla rešerše zahraniční literatury zabývající se problematikou svahových pohybů a jejich modelování. V první části byly analyzovány faktory ovlivňující vznik svahových pohybů a mechanismy k nim vedoucí. Tyto faktory jsou rozděleny do tří skupin: geologické, geomorfologické, antropogenní a landcover. Důležitým prvkem pro iniciaci svahového pohybu jsou tzv. spouštěče (triggery), mezi ty patří seismická činnost, srážky a říční eroze. V další části jsou rozebrány konkrétní výzkumy svahových pohybů z lokalit v Etiopské vysočině. Mezi popisované lokality patří například oblasti kolem města Dessie, Gilgel Gibe, Wondo Genet nebo nejlépe popsaná lokalita Dejen-Goahtsion. Bohužel vliv špatné infrastruktury v Etiopii se projevuje i na množství literatury a počtu výzkumů v této zemi, kdy většina výzkumů je prováděna v dobře dostupných oblastech. Závěrečná část teoretické části je pak věnována problematice modelování svahových pohybů a náchylnosti. V této kapitole jsou předloženy základní přístupy modelování náchylnosti a rozebrány konkrétní práce dalších autorů, kteří se zabývali modelováním náchylnosti v Etiopské vysočině.

Cílem praktické části této práce byla analýza náchylnosti ke svahovým pohybům v povodí Jemmy, která byla provedena na základě vytvořeného modelu náchylnosti. K vytvoření tohoto modelu bylo nutné aplikovat poznatky z teoretické části na mnou zkoumanou lokalitu. Vytvoření tohoto modelu sestávalo z dílčích částí. První je stanovení metodiky, která bude použita pro model náchylnosti. Nakonec byla použita vlastní metodika, která vychází z metodiky Holandána van Westena (van Westen 1997b). Tvorba tohoto modelu může místním pomoci v efektivnějším a bezpečnějším hospodaření a s trochou nadsázky může zachránit i lidské životy.

Dalším krokem byl sběr dat pro tento model. Kromě případy GIS dat se jednalo především o inventarizaci a kategorizaci svahových pohybů v oblasti povodí Jemmy, lokalita Portugalský most. Mapování bylo prováděno pomocí programu Google Earth. Celkově bylo vymapováno 242 svahových pohybů, které byly dále klasifikovány. Největší zastoupení měli jednoznačně sesuvy, nejméně pak říčení. Aplikace metod dálkového průzkumu pro zkoumání svahových pohybů je dnes velmi oblíbená

metoda, nicméně, je nutné se na tyto výstupy dívat kriticky a provést jejich verifikaci. Ta byla v mém případě provedena přímo v terénu. Na základě srovnání mapovacích prací a podkladových gis dat bylo zjištěno že největší počet deformací se vyskytuje v oblastech prudkých změn sklonů (většinou stupně teras). Říční jsou obecně situována do oblastí vysoké nadmořské výšky (>2300 m) a vyšší sklonitosti. Druhým trendem jsou proudové pohyby ve výškách mezi 1800 a 2100 m na sklonech mezi 20 a 40°. Téměř tři čtvrtiny všech pohybů se vyskytly na třetihorních vulkanitech, ať už na bazaltech jakékoli úrovně nebo na méně odolných tufech. Nejnížší zastoupení je pak na nejméně odolných prachovcích a jílovcích (2%). Říční se v této oblasti vyskytla pouze na bazaltech.

Vytvořená metodika byla dále aplikována na datové podklady. Základním principem metodiky je stanovení významnosti tříd jednotlivých parametrů na základě porovnání zastoupení svahových pohybů v dané třídě vůči zastoupení dané třídy. Na základě těchto dat byla také následně určena významnost jednotlivých parametrů. Vstupujícími parametry jsou: nadmořská výška, sklonitost, litologie, land cover, vzdálenost k vodnímu toku a vzdálenost ke geologickému rozhraní. Jako paramter s největším vlivem byla určena sklonitost, která se na výsledku modelu podílí z 38%, naopak nejmenší vliv má land cover. Vytvořená metodika je univerzální a dostatečně podrobně popsána, tak aby bylo možné ji použít i v jiných částech světa. Slabé a silné stránky metodiky včetně možností dalšího zlepšení jsou podrobně rozebrány v diskuzi.

Výsledná mapa náchylnosti dobře charakterizuje rozložení svahových pohybů v oblasti, které je popsáno výše. Výsledný podíl plochy v nejrizikovější třídě (velmi vysoká náchylnost) není zbytečně velký – 17% a naopak relativně velká část oblasti byla začleněna do třídy s nejnižší náchylností – 40%. Tomuto rozložení odpovídá také distribuce svahových pohybů ve třídách, nejvyšší náchylnost obsahuje přes 50% všech svahových pohybů, naopak nejnižší necelých 7%.

9. Seznam literatury

- ALMAZ, G., 1998. Slope instability assessment in the Blue Nile gorge, Ethiopia. In: Moore, D., Hungr, O. (Eds.), Proceedings of the 8th International IAEG Congress, Vancouver. Balkema, Rotterdam, pp. 1437–1442.
- ASFAW, Y., E. 2010. Landslide Assessment in Blue Nile Gorge, Central Ethiopia. Masther Thesis, University Gent, 82 p.
- ATKINSON, P.,M., MASSARI, R., 1998. Generalised linear modelling of susceptibility to landsliding in the central Apennines, Italy. Comput Geosci 24:373–385
- AYALEW, L., 1999. The effect of seasonal rainfall on landslides in the highlands of Ethiopia. Bulletin of Engineering Geology and Environment 58, 9–19.
- AYALEW, L., 2000. Factors affecting slope stability in the Blue Nile basin. In: Bromhead, E., Dixon, N., Ibsen, M. (Eds.), Landslides: In Research, Theory and Practice. Thomas Telford, Cardiff, Wales, pp. 101–106.
- AYALEW, L., TEMESGEN, B., 1995. Assessment of slope movements from Gohatsion to Dejen, Blue Nile gorge, Ethiopia. A Report Submitted to the Ethiopian Science and Technology Commission Addis Ababa, Ethiopia, 71 pp.
- AYALEW, L., YAMAGISHI, H., 2002. Landsliding and landscape development; the case in northern Ethiopia. International Congress of INTERPRAEVENT 2002 in the Pacific Rim. Matsumoto, Japan, pp. 595–606.
- AYALEW, L., YAMAGISHI, H., 2003. Slope failures in the Blue Nile basin, as seen from landscape evolution perspective. Geomorphology, 136, 1 – 22
- AYALEW, L., YAMAGISHI, H., 2004. Slope movements in the Blue Nile basin, as seen from landscape evolution perspective. Geomorphology, 57: 97-116
- AYELE, S., RAGHUVANSHI, T., K., KALA, P., M., 2014. Application of Remote Sensing and GIS for Landslide Disaster Management: A Case from Abay Gorge, Gohatsion–Dejen Section, Ethiopia. Landscape Ecology and Water Management Advances in Geographical and Environmental Sciences, 15-32
- AYENEW, T., BARBIERI, G. 2005. Inventory of landslides and susceptibility mapping in the Dessie area Northern Ethiopia. Engineering Geology 77: 1-15

- BARREDO, J., BENAVIDES, A., HERVA'S, J., VANWESTEN, C. 2000. Comparing heuristic landslide hazard assessment techniques using GIS in the Tirajana basin, Gran Canaria Island, Spain. JAG, 2(1), 9 – 23.
- BEDRNA, Z., 2002. Environmentálne podoznavectvo. VEDA, Bratislava.
- BERRY, L., 2003. Land Degradation in Ethiopia: Its Extent and Impact.
- BISHAW, B. 2001. Deforestation and Land Degradation in the Ethiopian Highlands: A Strategy for Physical Recovery. Oregon State University, Cornallis. Northeast African Studies, Volume 8, Number 1, pp. 7-25
- BRIGGS, R.P., 1974. Map of over dip slopes that can affect landsliding in Allegheny County, Pennsylvania: USGS Field Studies Map MF-543
- BROOHAERTS, N., KISSI, E., POESEN, J., VAN ROMPAEY, A., GETAHUN, K., VAN RANST, E., DIELS, J. 2012. Spatial patterns, causes and consequences of landslides in the Gilgel Gibe catchment, SW Ethiopia. Catena, 97, 127-136.
- BUCHROITHNER, M. 2002. Meteorological and earth observation remote sensing data for mass movement preparedness. Advances in Space Research, 29(1), 5– 16.
- CARRARA, A., CARDINALI, M., DETTI, R., GUZZETTI, F., PASQUI, V., REICHENBACH, P., 1991. GIS techniques and statistical models in evaluating landslide hazard. Earth Surf Process Landforms 16:427–445
- CRUDEN, D., M., HU, X., Q., 1996. Hazardous modes of rock slope movement in the Canadian Rockies. Environ Eng Geosci 2:507–516
- DAI, F. C. AND LEE, C.F., 2002. Landslide characteristics and slope instability modeling using GIS, Lantau Island, Hong Kong. Geomorphology 42: 213-228.
- D'AMATO AVANZI, G., GIANNECCHINI, R., PUCCINELLI, A., 2004. The influence of the geological and geomorphological settings on shallow landslides. An example in a temperate climate environment: the June 19, 1996 event in northwestern Tuscany (Italy). Eng Geol 73:215–228
- DEMEK, J. 1988. Obecná geomorfologie. Praha : ČSAV, 476 s. Kapitola Svahové pochody a vývoj svahů, s. 199–210.
- DONATI, L., AND TURRINI, M. C., 2002. An objective method to rank the importance of the factors predisposing to landslides with the GIS methodology: application to an area of the Apennines (Valnerina; Perugia, Italy). Engineering Geology 63: 277-289.

- FREEMAN, P., MARTIN, L., MECHLER, R., WARNER, K., 2003. A Methodology for Incorporating Natural Catastrophes into Macroeconomic Projections. In: van der Veen AA, Arellano V, Nordvik JP 2003. Proceedings: Point NEDIES and University of Twente Workshop - In search of a common methodology for damage estimation. Report EUR 20997 EN (2003), Bruxelles, Office for Official Publications of the European Communities, European Union p 51–165
- FUBELLI, G., ABEBE B., DRAMIS F., VINCI S. 2008. Geomorphological evolution and present-day processes in the Dessie Graben (Wollo, Ethiopia). *Catena*, 75, 1, s. 28-37.
- FUBELLI, G., GUIDA, D., CESTARI, A., DRAMIS, F. 2013. Landslide Hazard and Risk in the Dessie Town Area (Ethiopia). *Landslide Science and Practice*, pp 357-362
- GANI, N.D.S., GANI, M.R., ABDELSALAM, M.G. 2007. Blue Nile incision on the Ethiopian Plateau: Pulsed plateau growth, Pliocene uplift, and hominin evolution. 2007. *GSA Today*, 17, 4-11
- GANI, N.D.S., ABDELSALAM, M.G. 2006. Remote sensing analysis of the Gorge of the Nile, Ethiopia with emphasis on Dejen-Gohatsion region. *Journal of African Earth Sciences*. 44, 135-150
- GANI, N.D.S., ABDELSALAM, M.G., GERA, S. 2009. Stratigraphic and structural evolution of the Blue Nile Basin, Northwestern Ethiopian Plateau, *Geological Journal*. 44, 30-56
- GARZANTI, E., ANDO, S., VEZZOLI, G., MEGID, A.A.A., EL KAMMAR, A., 2006). Petrology of Nile River sands (Ethiopia and Sudan): Sediment budget and erosion patterns: *Earth and Planetary Science Letters*, v. 252, 327–341
- GLADE, T., CROZIER, M. J., 2005. The nature of landslide hazard impact. In: Glade, T., Anderson, M., Crozier, M. J. (Ed.), *Landslide Hazard and Risk*. John Wiley and Sons, Chichester.
- HANSEN, A. 1984. Landslide hazard analysis. In: Brundsen D, Prior DB (eds.) *Slope Instability*, John Wiley, New York, pp. 523-602
- HUGGEL, C., KAAB, A., HAEBERLI, W., TEYSSEIRE, PAUL, F. 2002. Remote sensing based assessment of hazards from glacier lake outbursts: A case study in the Swiss Alps. *Canadian Geotechnical Journal*, 39, 316– 330.
- KIM, U.; KALUARACHCHI, J. J.; SMAKHTIN, V. U. (2008): Climate change impacts on hydrology and water resources of the Upper Blue Nile River Basin, Ethiopia. Colombo, Sri Lanka: International Water Management Institute. (IWMI Research Report 126), 27 str.
- KLIMEŠ, J., BAROŇ, I., PÁNEK, T., KOSAČÍK, T., BURDA, J., KRESTA, F., AND HRADECKÝ, J. 2009. Investigation of recent catastrophic landslides in the flysch belt of Outer Western Carpathians (Czech

Republic): progress towards better hazard assessment, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 9, 119-128, doi:10.5194/nhess-9-119-2009

KLIMEŠ, J., 2003. Statistické metody tvorby modelů náchylnosti území ke vzniku svahových deformací, *Geomorfologický sborník 2 ČAG, ZČU v Plzni*, 279-286

KLIMEŠ, J., 2007. Hodnocení sesuvného ohrožení a metody tvorby map náchylnosti území ke vzniku svahových deformací, *Miscellanea Geographica 13 Katedra geografie, ZČU v Plzni*, s.23-28 23

KNIVETON, D., DE GRAFF, P., GRANICAS, K., HARDY, R. 2000. The development of a remote sensing based technique to predict debris flow triggering conditions in the French Alps. *International Journal of Remote Sensing*, 21(3), 419– 434.

KREJČÍ, O., BAROŇ, I., BÍLA, M., HUBATKA, F., JUROVÁ, Z., KIRCHNER, K., 2002. Slope movements in the Flysch Carpathians of Eastern Czech Republic triggered by extreme rainfalls in 1997: a case study. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, Volume 27, Issue 36, Pages 1567–1576*

KRIEGLEROVA, T., 2012. Rehabilitace degradovaných půd lesnickými opatřeními, případová studie Awassa Zuria Woreda z jižní Etiopie, *DIPLOMOVÁ PRÁCE, MENDELOVA UNIVERZITA V BRNĚ*, pp. 96

KUKAL, Z., 1983. Přírodní katastrofy, *Horizont*, 260 s

LANGHAMMER, J. ED. 2007- Povodně a změny v krajině. Přírodovědecká fakulta Univerzity Karlovy v Praze a Ministerstvo životního prostředí ČR, Praha. pp. 350

LARSEN, I., J., MONTGOMERY, D., R., 2012. Landslide erosion coupled to tectonics and river incision, *Nature Geoscience* 5, 468–473

LIN, P. S., LIN, J. Y., HUNG, H. C., & YANG, M. D. 2002. Assessing debris flow hazard in a watershed in Taiwan. *Engineering Geology*, 66, 295–313.

LINEBACK GRITZNER, M., MARCUS, W., ASPINALL, R., & CUSTER, S. 2001 .Assessing landslide potential using GIS, soil wetness modeling and topographic attributes, Payette River, Idaho. *Geomorphology*, 37, 149–165.

LORENTE, A., GARCIA-RUIZ, J., BEGUERIA, S., & ARNA´EZ, J. 2002. Factors explaining the spatial distribution of hillslope debris flows. *Mountain Research and Development*, 22, 32– 39.

MANTOVANI, F., SOETERS, R., & VAN WESTEN, C. 1996. Remote sensing techniques for landslide studies and hazard zonation in Europe. *Geomorphology*, 15, 213– 225.

- METTERNICHT, G., HURNI, L., GOGU, R., 2005. Remote sensing of landslides: An analysis of the potential contribution to geo-spatial systems for hazard assessment in mountainous environments. *Remote Sensing of Environment* 98, 284 – 303.
- MOEYERSONS, J., VAN DEN EECKHAUT, M., NYSSSEN, J., TESFAMICHAEL, G., VAN DE WAUW, J., HOFMEISTER, J., POESEN, J., DECKERS, J., MITIKU, H. 2008. Mass movement mapping for geomorphological understanding and sustainable development: Tigray, Ethiopia. *Catena*, s. 7545–7554.
- MRVÍK, O. 2006. Klasické a nové sesuvy v oblasti karpatského flyše. Materiál ke geotechnické exkurzi pořádané Hornicko-geologickou fakultou VŠB-TU Ostrava, 10 str.
- NYSSSEN, J., POESEN, J., MOEYERSONS, J., DECKERS, J., MITIKU, H., LANGE, A., 2003. Human impact on the environment in the Ethiopian and Eritrean highlands – a state of the art. *Earth-Science Reviews* 64, 273–320.
- PASÁK, V. A KOL., 1984. Ochrana půdy před erozí. Státní zemědělské nakladatelství Praha.
- PETLEY, D.N., MANTOVANI, F., BULMER, N.H., ZANNONI, A. 2005. The use of surface monitoring data for the interpretation of landslide movement patterns. *Geomorphology*, č. 66, s. 133-147
- SHARPE, C.F.S., 1938. Landslides and Related Phenomena. Columbia Univ. Press, New York, 137p.
- SHORTLIFFE, E. H., AND BUCHANAN, B. G., 1975. A model of inexact reasoning in medicine. *Mathematic bioscience*, 23: 351-379.
- SCHREIBEROVA, K. 2014. Klasifikace svahových pohybů s aplikací na vybrané oblasti Etiopské vysočiny, Praha, Bakalářská práce. Katedra fyzické geografie a geoekologie, Přírodovědecká fakulta, Univerzita Karlova v Praze. Vedoucí práce doc. RNDr. Vít Vílímek,Csc., 84 s
- SCHELSTREATE, 2010. Lithology and weathering products at the slip plane of landslides in SW Ethiopia. MSc Thesis, Faculteit wetenschappen, Universiteit Gent. (Available online: http://lib.ugent.be/fulltxt/RUG01/001/458/729/RUG01-001458729_2011_0001_AC.pdf)
- SUMMERFIELD, M. 1991. Global Geomorphology : an introduction to the study of landforms, Longman Scientific & Technical, 537
- SOETERS, R., AND VAN WESTEN, C.J. , 1996. Slope instability recognition analysis and zonation. In:Turner, K.T., Schuster, R.L. (eds), Landslide: investigation and mitigation. Spec Rep 47. Transportation Research Board, National Research Council, Washington, DC, 129–177.

- ŠÍMA, J., ZVELEBIL, J., KRUPÍČKA, J., a další. 2009. Water resources management and environmental protection studies of the Jemma River basin for improved food security. Czech Republic Development Cooperation, Aquatest a.s., Ministry of the Environment of Czech Republic, Prague, p 224
- TEMESGEN, B., MOHAMMED, M. U., KORME, T., 2001. Natural Hazard Assessment Using GIS and Remote Sensing Methods, with Particular Reference to the Landslides in the Wondogenet Area, Ethiopia. *Phys. Chem. Earth (c)*, 26(9): 665-675.
- UNITED NATIONS DEVELOPMENT PROGRAMME, Bureau of Crisis Prevention and Recovery. In: Jeggle, T. (ed.): United Nations publication. *Know Risk*, Tudor Rose Publishing, Geneva, 33–34
- WESTEN, V., C., 1997a. Prediction of the occurrence of slope instability phenomena through GIS-based hazard zonation. *Geol Rundsch* 86: 404-414.
- WESTEN, V., C., 1997b. Statistical landslide hazard analysis. ILWIS 2.1 for Windows application guide. ITC Publication, Enschede: 73–84.
- VARNES, D. J. 1978. Slope movement types and processes. In: Special Report 176: Landslides: Analysis and Control (Eds: Schuster, R. L. & Krizek, R. J.). Transportation and Road Research Board, National Academy of Science, Washington D. C., 11-33.
- VARNES, D.J., 1984. Landslide hazard zonation: a review of principles and practice, International Association of Engineering Geology Commission on Landslides and Other Mass Movements on Slopes, UNESCO, Paris: 63p.
- WOLDEAREGAY, K. 2013, Review of the occurrences and influencing factors of landslides in the highlands of Ethiopia: With implications for infrastructural development. *Momona Ethiopian Journal of Science (MEJS)*, V5(1):3-31
- ZELEDOVÁ, E., 2005. Ročníková práce, Univerzita Karlova, Vedoucí práce: Z. Kliment
- ZEZERE, J., L., FERREIRA, A., RODRIGUES, M., L., 1999. The role of conditioning and triggering factors in the occurrence of landslides: a case study in the area north of Lisbon (Portugal) *Geomorphology*, Volume 30, Issues 1–2, Pages 133–146
- ZHOU, C., LEE, C., LI, J., & XU, Z. 2002. On the spatial relationship between landslides and causative factors on Lantau Island, Hong Kong. *Geomorphology*, 43, 197– 207.
- ZVELEBIL, J., ŠÍMA, J., VILÍMEK, V., 2010. Geo-risk management for developing countries—vulnerability to mass wasting in the Jemma River Basin, Ethiopia. *Landslides*, Volume 7, Issue 1, pp 99-103

VYHLÁŠKA Ministerstva zemědělství č. 327/1998 Sb. Vyhláška Ministerstva zemědělství, kterou se stanoví charakteristika bonitovaných půdně ekologických jednotek a postup pro jejich vedení a aktualizaci

<http://www.gly.uga.edu/railsback/1121RiverMeanders.jpeg>

http://web.natur.cuni.cz/~langhamr/lectures/hydro/pdf/Kocum_Hydrometrie.pdf

<http://help.arcgis.com/>

www.zemepis.com